Edmond Nicolau
Constantin Bălăceanu

ELEMENTE DE NEUROCIBERNETICĂ

Scanned with OKEN Scanner

Edmond Nicolau ■ Constantin Bălăceanu

ELEMENTE DE NEUROCIBERNETICĂ

EDITURA ȘTIINȚIFICĂ

București ■ 1967

Scanned with OKEN Scanner

PREFAȚĂ

Din punct de vedere istoric se poate considera că știința ciberneticii se afirmă pentru prima dată prin lucrarea lui Norbert Wiener, intitulată Cibernetica sau știința comenzii și comunicării la ființe și mașini. *Mesajul nou pe care îl aducea această carte era afirmarea posibilității de a se studia comportarea unor sisteme de naturi diferite — biologice sau tehnice — făcînd abstracție de natura acestor sisteme și ținînd seama numai de circulația semnalelor, de informația purtată de semnale.*

În cele aproape două decenii care s-au scurs de la apariția cărții lui Wiener, conceptul de cibernetică a evoluat, astăzi cibernetica fiind definită ca știința despre conducere, prin conducere înțelegîndu-se utilizarea tuturor mijloacelor disponibile în vederea realizării unui anumit scop.

Această definiție abstractă pune în evidență atît caracterele generale desprinse și din definiția lui Norbert Wiener, dar evidențiază totodată finalitatea acțiunilor cibernetice.

Astfel, cibernetica, în concepția actuală, continuă să studieze sisteme — simple sau complexe — în care nu este esențială natura sistemului, ci modul în care se produce, se propagă, se prelucrează, se conservă și se recepționează semnalele purtătoare de informație. Se evidențiază de asemenea caracteristica importantă de finalitate din cibernetică, sistemele cibernetice tinzînd totdeauna spre realizarea unui anumit scop.

Din punctul nostru de vedere, neurocibernetica este acea ramură a ciberneticii care se ocupă de tratarea cibernetică a sistemului nervos al ființelor vii. Evident, acest studiu pleacă de la neuron — elementul de bază al sistemului nervos — și se termină cu studierea creierului uman.

Scanned with OKEN Scanner

Desigur că este temerar a crede că în mai puțin de două decenii cibernetica a reușit să schițeze o perspectivă coerentă și completă asupra întregului comportament al omului, asupra psihicului său, asupra creației artistice și asupra emoțiilor. Dar, ar fi la fel de riscant să se nege posibilitățile pe care le are cibernetica de a investiga psihicul uman, de a da o interpretare proprie, coerentă a tuturor manifestărilor nervoase, începînd cu cele mai simple forme întîlnite la animalele cu un sistem nervos rudimentar și sfîrșind cu cele mai rafinate activități intelectuale umane.

Metoda abordată de noi în această lucrare este trecerea de la simplu la complex, punctul de plecare fiind constituit de interpretarea cibernetică a datelor puse la dispoziție de neurofiziologie cu privire la neuron și sinapsă. Cu această ocazie, precizăm că cibernetica în ansamblu și neurocibernetica în particular, ca orice știință în dezvoltarea sa, beneficiază de întregul bagaj de cunoștințe științifice acumulate de omenire din cele mai vechi timpuri.

Centrul de greutate al prezentei lucrări este reprezentat de modelele logico-matematice ale neuronului și sinapsei. Ideea de bază este că toate funcțiunile sistemului nervos trebuie să fie tratabile, din punct de vedere cibernetic, pornind de la aceste modele. Întreaga lucrare nu face decît să urmărească modul în care, combinînd mai mulți neuroni, se pot obține modele ale unor structuri ce îndeplinesc funcțiuni din ce în ce mai complexe, începînd cu reflexe elementare și ajungînd pînă la mișcarea gîndirii umane.

În mod intenționat am evitat să prezentăm modelele tehnice propuse de diferiți autori (începînd cu modele de neuroni și terminînd cu mari agregate electronice de tipul perceptroanelor sau calculatoarelor moderne). Studiul acestor modele face obiectul bionicii. *În studiul nostru am folosit doar modele logice și matematice, deduse analitic din datele de neurofiziologie, iar sintezele propuse se bazează pe combinări logice între modelele neuronale și sinaptice. De aceea, un rol important în lucrarea noastră îl are studiul rețelelor neuronale și al dispozitivelor automate biologice formate din neuroni.*

Neurocibernetica va prelucra nu numai informația bogată deținută de neurofiziologi, dar și uriașul material psi-

Scanned with OKEN Scanner

hologic referitor atît la omul normal, cît și la cazurile patologice.

În ceea ce privește legitimitatea abordării cibernetice a activității psihice, ea se poate rezuma astfel: activitatea psihică este un fenomen natural, fiind supus ca atare unei anumite legități care poate fi cunoscută. Fenomenele psihice sînt rezultatul unor fenomene materiale care ascultă de legi generale, cunoscute cel puțin în parte din alte ramuri ale științei: matematică, fizică, chimie, biologie.

Dar, o dată cunoscînd aceste legi, devine posibilă abordarea cibernetică a modului în care semnalele provenite din mediul extern și intern al organismului, prin receptori, adică prin organele de simț periferice, sînt prelucrate de sistemul nervos. Astăzi cibernetica, pornind un atac convergent asupra necunoscutelor creierului, reușește să explice în primul rînd numeroase aspecte elementare de psihism și de comportament instinctual, trecînd apoi la abordarea însăși a gîndirii umane. În același timp, cibernetica a reușit, încă mai de mult, să modeleze forme de activități evoluate, cum ar fi traducerea automată, compunerea automată de texte, modelarea activității logice, compunerea de muzică etc.

În altă direcție, tocmai cu ajutorul unor mașini cibernetice se încearcă realizarea unor proteze senzoriale evoluate, care suplinesc simțurile deficitare, transferînd, de exemplu la orb, informația vizuală pe receptorul cutanat sau auditiv.

Importanța teoretică și practică a neurocibernetici nu poate fi astăzi încă suficient subliniată. Neurocibernetica aduce, în momentul de față, o contribuție importantă la explicația științifică a specificității proceselor psihice.

INTRODUCERE

1. Cibernetica este rezultatul unui lung proces evolutiv, la care şi-au adus contribuţia diverse ramuri ale ştiinţei. Astfel, în primul rînd, au fost esenţiale progresele realizate în cunoaşterea fiziologiei sistemului nervos central. Amintim cu această ocazie că o pleiadă importantă de neuroanatomişti şi de neurofiziologi au adus aportul lor la înţelegerea modului în care funcţionează creierul. La noi în ţară, şcoala lui Gh. Marinescu a adus o însemnată contribuţie la cunoaşterea morfologiei şi funcţiunilor sistemului nervos.

Alături de neurofiziologie, fiziopatologie, psihologie şi psihopatologie, esenţiale pentru apariţia ciberneticii au fost cercetările efectuate în radioelectronică şi în matematică.

Radioelectronica, pe de o parte, prin abordarea studiului sistemelor cu reacţie şi, pe de altă parte, prin studiul metodelor de combatere a distorsiunilor, a pus în evidenţă conceptele fundamentale de *sistem de reacţie* (vezi capitolul „Automate fiziologice"), *semnal*, *distorsionarea semnalului*, *prelucrarea semnalului*.

Matematica, în această epocă, a elaborat o serie întreagă de teorii foarte valoroase, cum ar fi : teoria probabilităţilor, teoria informaţiei, teoria algebrică a schemelor cu contacte şi relee, logica matematică, fundamentele matematicii, teoria demonstraţiei, metamatematica.

Este semnificativ faptul că în anul 1936 a început să se facă simţită interferenţa unor domenii foarte diferite, cum ar fi teoria algebrică a logicii, pe de o parte, şi studiul schemelor cu contacte şi relee, pe de altă parte. În anul 1936, simultan şi independent unul de altul, Şestakov — în Uniunea Sovietică — şi Shannon — în S.U.A. — au arătat posibilitatea de a se aplica la studiul schemelor

cu contacte şi relee teoria algebrică a logicii (algebra booleană, dezvoltată la sfîrşitul secolului trecut de matematicianul englez, G. Boole).

În fine, un aport esenţial la apariţia ciberneticii l-a adus tot electronica, prin crearea primelor calculatoare automate.

Aceste calculatoare reprezintă punctul de întîlnire a două linii importante de evoluţie a tehnicii şi anume: mecanizarea calculelor şi automatizarea.

a) În ceea ce priveşte tendinţa de mecanizare a calculelor, ea este străveche, putîndu-se considera că număratul pe degete şi, în orice caz, utilizarea pietricelelor în efectuarea calculelor (a se reţine că în limba latină *calculi* = pietricele) datează cel puţin din epoca sclavagistă.

Prima maşină matematică, în sens contemporan, a fost creată în 1642 de matematicianul, fizicianul şi filozoful Blaise Pascal.

b) Automatica, de asemenea, are origini vechi. Automatica este acea ramură a ştiinţei şi tehnicii care se ocupă de sistemele care au o evoluţie dinainte comandată de om, omul neintervenind direct în desfăşurarea proceselor.

Necesităţile vieţii practice, dorinţa omului de a-şi uşura condiţiile de muncă au făcut ca din cele mai vechi timpuri oamenii să caute mereu să-şi perfecţioneze metodele de lucru. Treptat, de la simpla unealtă utilizată de om în epoca comunei primitive, s-a trecut la automatele caracteristice epocii noastre.

Se numeşte *automatică* ştiinţa aplicată care se ocupă cu dispozitivele şi legăturile care realizează operaţiile de comandă sau de reglare a instalaţiilor sau proceselor tehnice.

Este incontestabil meritul lui Norbert Wiener de a fi arătat că automatica — aşa cum fusese ea creată, printr-o serie de lucrări efectuate în primele decenii ale acestui secol —, se poate aplica şi la studiul fiinţelor vii.

În fine, o dată cu dezvoltarea teoriei abstracte a automatelor, s-a constatat că automatica studiază o serie de modele în care nu este esenţială realizarea concretă într-un mod sau altul a schemelor abordate, *esenţială fiind*

Scanned with OKEN Scanner

schema abstractă a sistemului. În același timp însă s-a ajuns la concluzia importantă că schemele studiate de automatică coincid în unele cazuri cu schemele studiate și de radioelectronică; este cazul unora dintre sistemele cu reacție.

Toate aceste direcții de dezvoltare au condus la degajarea ideii importante că este cu putință să se dezvolte o știință a sistemelor, în care să nu fim interesați de modul particular în care se realizează un anumit sistem — cu tuburi electronice, amplidine, celule, țesuturi sau organe biologice etc.—, esențială fiind conexiunea realizată între diferitele elemente.

Această știință, care s-a dezvoltat tocmai plecînd de la aceste considerente, este *cibernetica*.

Din punct de vedere cibernetic, putem stabili analogii între sisteme foarte diverse. Astfel, țesătorul Jacquard, din Lyon (1752—1834), a inventat războiul de țesut, care își desfășura singur evoluția în timp, în conformitate cu perforațiile practicate într-o serie de cartoane. Acest sistem primitiv este, însă, primul exemplu, înregistrat de istoria tehnicii, al unui sistem automat cu program. Metoda înregistrării programului prin perforații se păstrează pînă în zilele noastre, fiind utilizată la calculatoarele electronice rapide.

Perforațiile reprezintă spațializarea unui program care se va desfășura apoi în timp, în conformitate cu un anumit cod.

În biologie, o situație asemănătoare o întîlnim în genetică, informația ereditară fiind înregistrată spațial, prin dispunerea bazelor purinice și pirimidinice în macromoleculele de nucleoproteine (ADN).

Cibernetica intervine deci nu numai la nivelul marilor sisteme tehnice sau de comunicații la scară biologică, dar și în cadrul unor sisteme elementare, de dimensiuni foarte mici, ultramicroscopice, cum este acela al moleculelor de acizi nucleici. Cu aceasta am atins o altă caracteristică a ciberneticii, și anume faptul că cibernetica studiază sisteme diferite, făcînd abstracție nu numai de natura fizică a elementelor care intervin în realizarea sistemelor studiate, dar și de dimensiunile acestor sisteme.

Scanned with OKEN Scanner

2. Contribuţia şcolii româneşti la cibernetica mondială este valoroasă şi multilaterală.

În ceea ce priveşte sistemele automate, se remarcă o serie de lucrări efectuate atît în domeniul automatelor cu un număr finit de stări, cît şi al automatelor continue neliniare.

În numeroase instalaţii în care intervin relee, tuburi electronice şi alte dispozitive, avînd un număr infinit de stări, studiul comportării sistemelor se poate face recurgînd la algebra logicii.

În domeniul automatelor finite — adică al automatelor avînd un număr finit de stări — se remarcă lucrările elaborate de acad. Gr. C. Moisil şi colaboratorii. Într-o statistică publicată de Academia de Ştiinţe a Uniunii Sovietice se arată că România se află, în ceea ce priveşte numărul publicaţiilor în acest domeniu, pe locul trei, după S.U.A. şi U.R.S.S.

În domeniul automatelor cu funcţionare continuă se remarcă grupul de lucrări efectuate de ing. V. M. Popov, membru corespondent al Academiei Republicii Socialiste România, care a stabilit un criteriu general de stabilitate a sistemelor cu reacţie.

În această direcţie există, de altminteri, preocupări mai vechi ale unor specialişti români, printre care T. Tănăsescu, Gh. Cartianu, Edm. Nicolau, M. Drăgănescu şi alţii.

În ultimii ani, la noi în ţară s-au efectuat numeroase studii privind aplicaţiile cibernetici în biologie şi medicină.

Astfel acad. St. Milcu şi colaboratorii au elaborat o serie de scheme privind sistemele endocrine întîlnite la om.

Prof. E. Repciuc şi colaboratorii au studiat schemele de reglare homeostatică a organismului. Amintim că prin homeostazie se înţelege menţinerea constantă a unor mărimi.

Numeroşi cercetători s-au ocupat de problema modelării neuronului şi a funcţiunilor sale. În unele cazuri (C. Bălăceanu şi Edm. Nicolau) este vorba de schema logică a neuronului, ca şi de interpretarea activităţii nervoase plecînd de la această schemă.

Scanned with OKEN Scanner

Mergînd pe o altă linie, D. Farcaș a propus un model de rețea neuronală care poate fi simulată pe un calculator digital. Cu ajutorul programului stabilit de Farcaș se pot modela unele din comportările de bază ale rețelelor neuronale.

Alte studii (N. Sotirescu și colab.) se ocupă de interpretarea anumitor fenomene neuronale, de exemplu de stabilirea unor modele ale membranei neuronale.

Gh. Cartianu interpretează unele fenomene nervoase prin prisma circuitelor în care există semnale modulate în frecvență.

În domeniul inteligenței artificiale, de asemenea, specialiștii noștri au adus o serie întreagă de contribuții valoroase.

Precizăm că prin inteligență artificială se înțelege simularea pe modele a activității intelectuale a omului.

Încă din anul 1962, sub conducerea directă a acad. Gr. C. Moisil, au avut loc la Timișoara primele experimente de traducere automată din engleză în română. Algoritmul traducerii a fost elaborat de E. Domonkoș.

La Centrul de calcul al Universității din București s-au rezolvat de asemenea numeroase probleme, cum ar fi: stabilirea unor algoritmi pentru compunerea automată a muzicii; algoritmizarea unor jocuri; elaborarea unor strategii optime pentru diferite probleme economice etc.

O mențiune specială trebuie făcută pentru elaborarea unei teorii generale a clasificării (P. Constantinescu), care se referă la clasificarea obiectelor unei mulțimi abstracte, avînd fiecare un număr de indici aparținînd fiecare unei mulțimi abstracte (taxonomie matematică).

Această metodă de clasificare se poate aplica în diverse domenii, ca bacteriologie, arheologie etc., fiind vorba de o problemă generală de *taxonomie*, după cum se numește știința generală a clasificării.

În ceea ce privește neurocibernetica propriu-zisă, la noi în țară colectivul nostru a publicat numeroase lucrări privind motilitatea, recunoașterea formelor, cibernetica vederii și a auzului, transmiterea informației prin sinapsă, limbajul, modelarea gîndirii logice etc.

Scanned with OKEN Scanner

Studiile de modelare pe cale electronică a unora dintre fenomenele nervoase elementare sînt mai vechi. Încă din anul 1957 unul din noi (E. N.) a realizat, la Institutul politehnic din București, modele electronice pentru reflexele condiționate, modele avînd o comportare superioară altor modele electronice descrise în literatura internațională.

Ulterior, tot aici, s-a elaborat și un model de analizor cortical și s-au realizat mașini care recunosc automat vocalele limbii române, respectiv diferite forme grafice. Tot în laboratoarele Facultății de electronică a acestui institut s-a construit și un aparat care sintetizează, pe cale electronică vocale.

În ceea ce privește abordarea cibernetică a problemelor învățării, amintim că interpretarea stocastică a acestor procese a fost îmbunătățită de către cercetările lui R. Theodorescu.

Un model cibernetic privind fenomenul de învățare și utilizarea teoriei informației în interpretarea acestui proces se datorește lui M. Beliș.

Aplicînd sistematic metodele ciberneticii în psihologie, Gh. Zapan a reușit să obțină o serie de interpretări cantitative, privind unele manifestări psihice.

În domeniul neurologiei, unele aspecte legate de cibernetică au fost abordate de V. Voiculescu și M. Steriade, de I. Voinescu et. al.

În ceea ce privește teoria comunicațiilor, amintim de faptul că monografia *Modulația de frecvență* de Gh. Cartianu, membru corespondent al Academiei, a apărut în două ediții în limba rusă, fiind în curs de apariție alte ediții în limbile franceză și maghiară.

Sergiu Condrea s-a ocupat de semnalele limitate, ca și de problemele generale ale măririi eficienței sistemelor de transmitere a informației.

A. Spătaru a abordat problema teoriei generale a semnalului, insistînd asupra sistemelor de transmitere a informației în televiziune — în particular în televiziunea în culori.

Chr. Vasiliu a reușit să dea o teoremă generală privind reprezentarea semnalelor.

Scanned with OKEN Scanner

În ceea ce privește noțiunile de bază ale teoriei informației, amintim că acad. O. Onicescu și acad. Gh. Mihoc au introdus în știință conceptul fundamental de lanț cu legături complete.

Alte rezultate privind teoria informației se datoresc lui M. Rosenblatt-Roth, S. Guiașu și R. Theodorescu.

Valoroasă este și contribuția pe care filozofii români au adus-o la elucidarea unora dintre problemele teoretice ridicate de cibernetică.

Într-o lucrare prezentată la cel de-al doilea Congres internațional de cibernetică de la Namur, V. Săhleanu a prezentat o concepție în care cibernetica este considerată ca un nou punct de vedere.

Ileana Mărculescu s-a ocupat de asemenea de numeroase aspecte ale ciberneticii, dintre care majoritatea privesc implicațiile ei filozofice.

O serie de studii privind revoluția tehnico-științifică contemporană se datoresc lui V. Roman, care a studiat problema atît sub aspectele ei generale, cît și, în special, în legătură cu țara noastră.

■

În domeniul analizei numerice — adică al metodelor de rezolvare aproximativă a problemelor — trebuie amintit în primul rînd grupul de lucrări efectuate la Institutul de calcul al filialei din Cluj a Academiei, sub conducerea acad. Tiberiu Popovici, director al acestui institut.

În ceea ce privește construcția calculatoarelor electronice la noi în țară, amintim că primul calculator electronic — CIFA 1 — a intrat în funcțiune în anul 1957. El este primul calculator proiectat și realizat care a intrat în funcțiune într-o țară de democrație populară.

Ulterior, s-au construit alte calculatoare la București (CIFA 2, CIFA 3, CIFA 101, CIFA 102), la Timișoara (MECIPT 1) și la Cluj (DACICC 1).

Alte calculatoare digitale sînt în construcție în diferite centre.

Scanned with OKEN Scanner

La Institutul politehnic din Timişoara, sub conducerea prof. A. Rogojan, se construieşte un calculator digital cu ferite.

În ceea ce priveşte calculatoarele analogice, amintim de calculatorul CAU 1, de la Academia militară tehnică din Bucureşti, şi de calculatoarele MECAN de la Institutul de energetică al Academiei Republicii Socialiste România.

În domeniul calculatoarelor analogice specializate, la Cîmpina s-a realizat un model electronic al pompajului de adîncime, prin colaborarea specialiştilor de la Institutul de cercetări foraj-extracţie de la Cîmpina şi Institutul politehnic „Gheorghe Gheorghiu-Dej" din Bucureşti.

Alte calculatoare specializate s-au construit la Institutul de petrol, gaze şi geologie din Bucureşti, institutele de fizică atomică din Bucureşti şi Cluj etc.

■

Este cazul să amintim că, în afara cercetărilor susamintite, şi alţi cercetători de la noi din ţară au abordat probleme cibernetice.

Fără a putea face o prezentare exhaustivă a problemelor de cibernetică abordate în ţara noastră se constată, din simpla enunţare anterioară, multitudinea de preocupări şi de realizări obţinute în acest domeniu în patria noastră.

Aceasta constituie o dovadă a avîntului general pe care îl are ştiinţa şi tehnica în ţara noastră şi este totodată o garanţie a succeselor viitoare.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul I

ELEMENTE DE TEORIA INFORMAȚIEI

I, 1. *Generalități.* Orice știință pornește de la anumite noțiuni primare, care nu sînt reductibile la alte noțiuni mai elementare. În cazul ciberneticii se poate considera că noțiunile primare sînt: *blocul funcțional*, *semnalul* și *informația*. Cîteva exemple vor preciza sensul acestor noțiuni. Într-o discuție, la un moment dat, o persoană vorbește, iar o altă persoană o ascultă: una este *sursa, S*, iar cealaltă *receptorul, R*, care recepționează mesajul transmis de sursă. La fel, un post de emisie de televiziune este sursa semnalelor recepționate în televizor etc. Cu un schematism împins la maximum, schema unui *sistem de comunicații* se poate reprezenta ca în fig. 1,1.

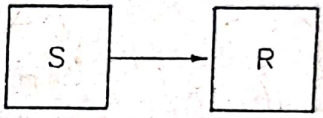


Fig. 1.1. Sistem simplu de comunicație
S – sursa informației;
R – receptor

În cazul comunicațiilor telefonice, una dintre cele două persoane care conversează poate fi considerată drept *blocul funcțional* care produce semnalele purtătoare de informație. Persoana care ascultă este, de asemenea, un bloc funcțional care recepționează aceste semnale. Aparatul telefonic, liniile de comunicații și toate echipamentele aferente constituie alt bloc funcțional, care leagă între ele sursa și receptorul: este *canalul de comunicații, C*. De altminteri, canalul de comunicații este prezent și în cazul unei conversații; aerul dintre spațiul situat între gura celui ce vorbește și urechile celui care ascultă este canalul de comunicații.

Într-o a doua aproximare, sistemul de comunicații se reprezintă ca în figura 1,2.

Același sistem poate fi însă considerat punînd în evidență și alte elemente, care în primul caz erau cuprinse

Scanned with OKEN Scanner

în blocurile funcționale mai mari, amintite anterior în cazul conversației. Sursa produce mesajul sub forma unor cuvinte, adică a unor vibrații ale aerului. Undele sonore produse întîlnesc microfonul, care transformă presiunea

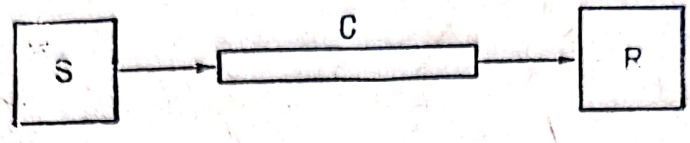


Fig. 1,2. Sistem de comunicație la care sursa S este legată de receptorul R prin canalul de comunicație C

variabilă a aerului în variații ale intensității curentului electric. În timp ce semnalele produse de sursă sînt inițial semnale de natură elastică (unde sonore), cu ajutorul microfonului natura fizică a semnalelor se schimbă, devenind semnale electrice. Aparatele care schimbă natura semnalelor se numesc *traductoare*.

Curentul electric rezultat din interacțiunea undelor sonore cu microfonul se propagă apoi pe linia telefonică, ajungînd la receptorul telefonic, aparat care transformă din nou natura semnalelor, în sensul că transformă semnalele electrice din nou în unde elastice, care ajung apoi la blocul receptor.

În același timp însă se constată că la receptor semnalele primite nu sînt identice cu cele emise. Aceasta din mai multe cauze. Pe de o parte, trecînd prin diferitele elemente ale sistemului de comunicații, semnalele își modifică forma, sînt *distorsionate*. În al doilea rînd, linia de comunicații și toate celelalte instalații produc sau captează *perturbații* electrice de diferite naturi, care se traduc sub forma unor zgomote în receptor. Schema unui sistem de comunicații se prezintă deci — în a treia aproximare — ca în figura 1,3, unde P este un generator de zgomot (sursa perturbațiilor), iar T_1 și T_2 sînt traductoare.

Se poate aborda un studiu abstract general al sistemelor cibernetice, plecînd de la diferitele scheme funcționale care se pot imagina ca modele ale unor sisteme reale.

În acest gen de tratare a problemei, cel mai simplu bloc funcțional este acela care are o singură legătură. Dacă

legătura este astfel încît semnalele pleacă din bloc spre exterior, sîntem în prezența unei surse. În caz că semnalele vin din exterior înspre bloc, sîntem în prezența unui receptor.

O primă problemă care se pune este aceea a caracterizării diferitelor categorii de surse, respectiv de receptoare.

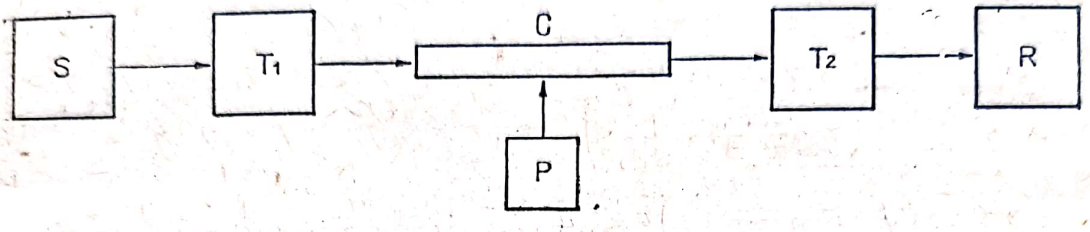


Fig. 1,3. Schema completă a unui sistem de comunicație
S — sursa informației; T_1T_2 — traductoare; C — canal de comunicație; R — receptor; P — sursa perturbațiilor

Cea mai simplă legătură informațională este legătura în care o sursă este pusă în raport direct cu un receptor (fig. 1,1).

Pentru a caracteriza sursele, trebuie să cunoaștem în primul rînd succesiunea în timp a semnalelor produse la ieșire.

Semnalele pot fi clasificate după diverse criterii. Este uzual a se clasifica semnalele în *continue* și *discrete*. De exemplu, intensitatea curentului în linia de comunicații telefonică are o variație continuă, ca de altfel și fluxul sonor. Intensitatea curentului în linie poate varia — cel puțin teoretic — în mod continuu, între două valori extreme — una minimă și alta maximă. Din contra, în cazul transcrierii unei convorbiri se utilizează litere, alese dintr-un alfabet finit: sîntem în prezența unor semnale discontinue sau discrete.

În general, în cazul semnalelor discrete, se utilizează un număr finit de semnale diferite între ele. Aceste semnale se numesc *litere*, chiar dacă sînt de altă natură: impulsuri electrice, semne grafice etc.

Spunem că o sursă ne dă o informație în momentul t atunci cînd nu se cunoaște dinainte semnalul care va fi produs în momentul t. În caz contrar, semnalul fiind deter-

minat, sursa nu ne dă nici o informație. Pentru a evalua, deci, cantitativ, caracteristicile unei surse, este necesar să introducem un concept nou, anume acela de *măsură a cantității de informație.*

Pentru a se introduce noțiunea de cantitate de informație este necesar să se facă în prealabil cîteva ipoteze de lucru și cîteva precizări.

Lista tuturor semnalelor elementare utilizate se numește *alfabet*. Se spune că un alfabet care are n litere are lungimea n. Succesiunile de litere (abstracte) se numesc *cuvinte* (abstracte).

Se cere să se stabilească cantitatea de informație pe care o dă o sursă ce produce la ieșire litere din alfabetul A.

Observăm că dacă se cunoaște dinainte succesiunea de litere ale tuturor cuvintelor date de o sursă, atunci sursa respectivă nu ne dă nici o informație. Lucrurile stau ca și cum cineva ne-ar comunica în timp ce citim acest text că citim un text. Prin aceasta mesajul său nu ne dă nici o informație sau, cu alte cuvinte, ne dă o informație nulă.

Pentru a stabili care este cantitatea de informație pe care ne-o dă un mesaj utilizînd un alfabet A de lungime n vom admite, în primul rînd, că sursa produce aceste litere într-un mod care nu este dinainte cunoscut, în sensul că nu putem ști dinainte care va fi litera produsă la un anumit moment. Dar, cu toate acestea, sursa este caracterizată prin anumite proprietăți statistice, astfel încît știm că, în medie, fiecare literă are o anumită frecvență de apariție.

Pentru a se calcula frecvența de apariție a unei litere într-un text se consideră toate literele din acel text, numărul lor fiind N. Litera a este întîlnită în acest text de N_a ori. Prin *frecvența de apariție* a literei a se înțelege raportul

$$f_a = \frac{N_a}{N}.$$

Este ușor de admis că dacă toate literele apar cu aceeași frecvență, atunci nedeterminarea apariției unei litere este cu atît mai mare, cu cît lungimea n a alfabetului este mai mare. Dacă se notează cu I măsura cantității de infor-

mație, se poate spune că I este o funcție monoton crescătoare de n, deoarece depinde de nedeterminarea apariției unei litere.

Spunem că rezultatul unei experiențe ne comunică o informație atunci cînd rezultatul acestei experiențe nu este cunoscut dinainte.

Să considerăm mai întîi cazul intuitiv al unui eveniment care se poate realiza în n moduri diferite, toate egal de probabile. Desigur că informația astfel obținută are o măsură care depinde numai de n. Dacă se notează cu I măsura cantității de informație, atunci se poate scrie $I = I(n)$.

Dacă $n = 1$, atunci alfabetul nostru cuprinde o singură literă, deci dacă acea literă este notată de exemplu cu a, singurul mesaj pe care-l putem obține în acest alfabet este $aaa\ldots$ Deoarece apariția literei a este determinată, acest mesaj nu ne dă nici o informație, deci rezultă condiția:

$$I(1) = 0 \tag{1}$$

Trebuie observat cu această ocazie că, în general, spațiul dintre litere este tot o literă, astfel încît un alfabet care cuprinde o literă și spațiul dintre litere are de fapt două litere.

Rezultă, deci, că pentru a se transmite o informație este absolut necesar ca n să fie mai mare sau cel puțin egal cu 2. Cazul $n = 2$ corespunde unui alfabet în care se dispune de o pauză și o literă propriu-zisă cu care se pot forma diferite cuvinte.

În al doilea rînd, după cum s-a arătat, I trebuie să fie o funcție uniform crescătoare de n, deoarece o dată cu creșterea lui n crește și nedeterminarea modului în care se poate desfășura experimentul — deci informația obținută prin producerea evenimentului este mai bogată. Aceasta constituie condiția (2).

I, 2. *Entropia informațională.* Să considerăm un alfabet de lungime $n \neq 1$ și fie un mesaj format din s litere. În total se pot forma $N = n^s$ astfel de mesaje. Gradul de nedeterminare al unui mesaj este cu atît mai mare, cu cît N este mai mare.

Scanned with OKEN Scanner

Rezultă că I_M, ce reprezintă cantitatea de informație pe care ne-o dă un mesaj, este proporțională cu s și depinde de numărul N de mesaje ce se pot obține combinînd în toate modurile posibile cele n tipuri de semnale ale alfabetului respectiv, în șiruri de s semnale. Putem scrie deci:

$$I_M = I_M(N) = I_M(n^s) = Ks. \tag{2}$$

Se deduce

$$I_M(n^s) = ks \lg n.$$

Informația medie pe literă este deci

$$I = \frac{I_M}{s} = k \lg n.$$

Această formulă a cantității de informație a fost dată de Hartley, în anul 1926.

Baza logaritmului este arbitrară. Este uzual a se lua baza 2, în care caz cantitatea de informație se măsoară în *biți/simbol*; în acest caz se ia $k = 1$.

Se obține o informație de 1 bit într-o experiență care nu se poate desfășura decît numai în două moduri.

Formula dată pentru I satisface cele două condiții (1) și (2) enunțate mai sus.

În cazul în care diferitele litere ale alfabetului apar cu frecvențe diferite, adică pentru a vorbi în termeni generali sîntem în prezența unui eveniment care se poate produce în n moduri diferite, fiecare mod fiind caracterizat printr-o probabilitate p_i, formula dată anterior desigur că nu se mai poate aplica.

Trebuie să găsim o metodă cu ajutorul căreia să se stabilească valoarea cantității de informație dată, în cazul în care diferitele evenimente au probabilități diferite de apariție.

În acest caz, măsura cantității de informație se notează H și se numește *entropie*.

Într-un memoriu fundamental datorat lui Shannon (1946) s-a arătat că se poate stabili expresia funcției H admițînd următoarele postulate:

1. H este o funcție continuă de toate variabilele p_i.

2. Dacă toate probabilitățile p_i sînt egale între ele, atunci H coincide cu I. Dacă alfabetul are n litere, atunci desigur că $p_i = 1/n$. În acest caz, cînd toate evenimentele sînt echiprobabile, H este o funcție monoton crescătoare de n.

3. Dacă un experiment este descompus în alte două experimente succesive, atunci H, care corespunde evenimentului compus, este suma ponderată a celor două expresii care corespund lui H pentru evenimentele parțiale.

Admițînd cele trei postulate enunțate, se poate enunța următoarea teoremă referitoare la H:

Singura funcție H care satisface cele trei condiții enunțate anterior este

$$H = -k \sum_{i=1}^{n} p_i \lg p_i$$

unde k este o constantă pozitivă. Se constată că dacă toate evenimentele se realizează cu aceeași probabilitate, definiția entropiei dată de Shannon coincide cu definiția cantității de informație dată de Hartley.

Dacă baza logaritmului este 2, atunci $k = 1$ și entropia se evaluează tot în biți/simbol.

Un caz important care trebuie analizat este acela al lui $n = 2$. Fie p și $q = 1 - p$ cele două probabilități de realizare a evenimentelor E_1 și E_2. Conform definiției

$$H = -p \lg p - (1 - p) \lg (1 - p).$$

Funcția H depinde de o singură variabilă, anume probabilitatea p de realizare a evenimentului E_1. În figura 1,4 se reprezintă modul de variație a entropiei H cu probabilitatea p.

Se observă că entropia este maximă în cazul în care $p = q - 0{,}5$. Entropia este maximă în cazul în care toate evenimentele sînt echiprobabile, deoarece în acest caz nedeterminarea evenimentului este maximă.

Acest rezultat se poate generaliza și în cazul alfabetelor de o lungime oarecare.

Entropia se măsoară tot în unități binare, adică în biți/eveniment. Se poate vorbi deci despre informația medie

Scanned with OKEN Scanner

pe care o dă o literă dintr-un text sau în general de producerea unui eveniment.

Valoarea entropiei măsoară nedeterminarea evenimentului. Ea e cu atît mai mare, cu cît această nedeterminare este mai mare.

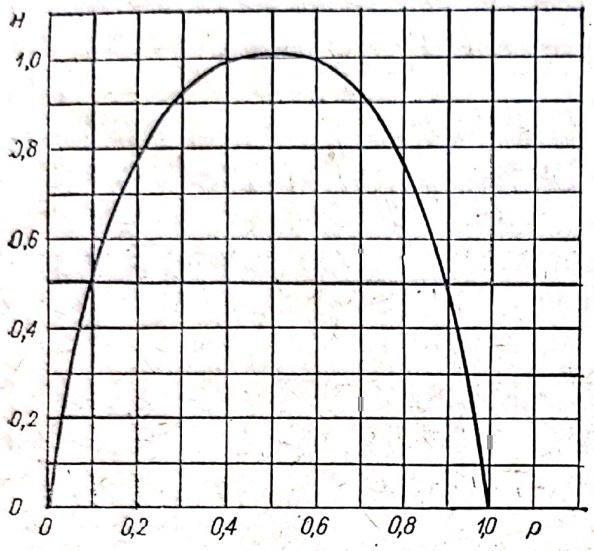


Fig. 1,4. Reprezentare grafică a valorii entropiei H în cazul unei experiențe care se desfășoară în două moduri posibile, unul din aceste moduri avînd probabilitatea de apariție p

Revenind la cazul textelor scrise într-un anumit alfabet și calculînd frecvențele de apariție a diferitelor litere, se constată că este posibil să se determine entropia acelui text cu diferite grade de precizie.

O primă abordare a problemei constă în considerarea tuturor literelor ca fiind echiprobabile. În acest caz, pentru un alfabet de lungime n se obține

$$H_0 = \lg_2 n.$$

Aceasta reprezintă aproximația de ordin zero a entropiei H.

De exemplu, în cazul limbii române, ținînd seama și de existența pauzei considerată ca o literă a alfabetului, se obține

$$H_0 = \lg_2 27 .$$

O determinare mai exactă se poate face ținînd seama de probabilitățile diferite de apariție a literelor. Analiza unor texte poetice din Eminescu, Arghezi și Macedonski arată că entropia are valoarea

$$H = 3{,}5 \text{ biți/literă}.$$

În realitate însă, în interiorul limbii literele nu apar izolate, ci în grupuri, dintre care unele reprezintă anumite flexiuni gramaticale, corespunzînd conjugării și declinării

etc. Aceste fenomene gramaticale arată că mai corect este să se considere apariția nu a literelor izolate, ci a grupurilor de litere.

În limbile naturale, literele apar cu probabilități diferite unele de altele, unele litere fiind mai frecvente decît altele. De exemplu, în limba română, literele *e* și *i* sînt mult mai frecvente decît *h* sau *z*. Aceasta corespunde organizării unui text și, ca urmare, a valorilor diferite pe care le au frecvențele de apariție a literelor. Entropia are astfel o valoare mai mică decît valoarea maximă ce corespunde unei nedeterminări maxime, respectiv cazului în care toate literele sînt echiprobabile, caz care ne dă pe H_0.

Diferența dintre entropia maximă care s-ar putea obține într-un alfabet și entropia reală a unui anumit text scris în acel alfabet se numește *redondanță absolută* a textului respectiv. Raportul dintre redondanța absolută și valoarea maximă a entropiei se numește *redondanță relativă* și se calculează cu formula

$$R = \frac{H_0 - H}{H_0}.$$

În cazul limbii române — ca și al altor limbi — redondanța variază mult, între 10 și 60%.

Existența redondanței corespunde faptului că în cazul tuturor limbilor acționează legături fonetice, gramaticale și logice, care fac ca unele litere să fie de prisos; aceasta se traduce și prin faptul că, într-un text dat, anumite litere se pot suprima, fără ca sensul textului să se piardă. Deci, existența redondanței face ca mesajele să poată fi interpretate chiar atunci cînd ele se transmit în prezența zgomotului. Existența redondanței nu este specifică vorbirii, ea intervenind ori de cîte ori se urmărește a mări stabilitatea unei comunicații față de acțiunea perturbațiilor.

I, 3. *Semnale.* Pentru a transmite o informație este necesar să se dispună de un semnal care își variază în timp unul din parametri.

Semnalele, după modul lor de variație în timp, pot fi clasificate — cum am văzut — în continue și discrete. Vor-

Scanned with OKEN Scanner

birea reprezintă o variație continuă a presiunii aerului, în timp ce transcrierea aceluiași mesaj cu ajutorul literelor conduce la semnale discrete (literele alfabetului utilizat).

În numeroase instalații tehnice se recurge la semnale discrete, această tendință observîndu-se în radioelectronica contemporană. Nu este însă lipsit de interes să semnalăm faptul că și de-a lungul sistemului nervos se utilizează tot sisteme discrete de transmitere a informației cu ajutorul impulsurilor.

În practică, pentru transmiterea informației se utilizează două mari categorii de informații, și anume: semnalele sinusoidale și semnalele în impulsuri.

Prin definiție, o mărime care are o variație sinusoidală în timp este de forma

$$a = A \sin (\omega t + \varphi)$$

unde: A este amplitudinea semnalului;
ω — pulsația;
φ — faza.

Pentru a transmite o informație cu ajutorul acestui semnal se poate varia în timp, după o lege prestabilită, fiecare din aceste trei mărimi prestabilite.

După cum se variază amplitudinea, frecvența sau faza, sîntem în prezența unei *modulații de amplitudine*, de *frecvență* sau de *fază*.

În figura 1,5 se arată atît un semnal sinusoidal (*b*) cît și semnalul modulator — semnalul care reprezintă informația de transmis — de exemplu variația în timp a temperaturii într-un anumit punct (*a*). În figura 1,5 *c*, *d*, *e* se reprezintă variația corespunzătoare a semnalului în cazul unei modulații de amplitudine, respectiv de frecvență, respectiv de fază.

Dar aceeași informație poate fi redată și cu ajutorul unor semnale sub formă de impulsuri. În figura 1,6 se reprezintă tipurile de semnale modulate în impulsuri.

Se observă că la impulsuri se pot varia mai mulți parametri, încît se disting mai multe tipuri de modulație, și anume *modulație în amplitudine, în frecvență, în poziție și în durată*.

Scanned with OKEN Scanner

Menționăm că în cazul transmiterii semnalelor de-a lungul axonului neuronal, sîntem în prezența unor semnale în impulsuri, modulate în frecvență, așa după cum se va arăta mai departe.

În legătură cu modulația de impulsuri și în general cu relația dintre semnalele continue și cele discontinue, trebuie amintit faptul că fiind dat un semnal cu variație continuă, el poate fi aproximat printr-un semnal în trepte, așa cum se arată în figura 1,7.

Trecerea de la semnalele continue la cele discontinue se face prin operația de *cuantizare*. Se distinge o cuantizare la niveluri date și o cuantizare la momente date.

În cazul cuantizării la niveluri date se trece de la o treaptă la treapta următoare în momentul în care mărimea de aproximat atinge valoarea unei trepte (fig. 1,7 *a*).

În cazul cuantizării la momente date (fig. 1,7 *b*) se compară periodic, prin sondaje sau măsurări, valoarea mărimii de aproximat cu valorile treptelor și se trece la aproximarea mărimii date prin treapta imediat superioară acesteia. Și în sistemul nervos se regăsește principiul cuantizării la momente date. De exemplu, pentru analizato-

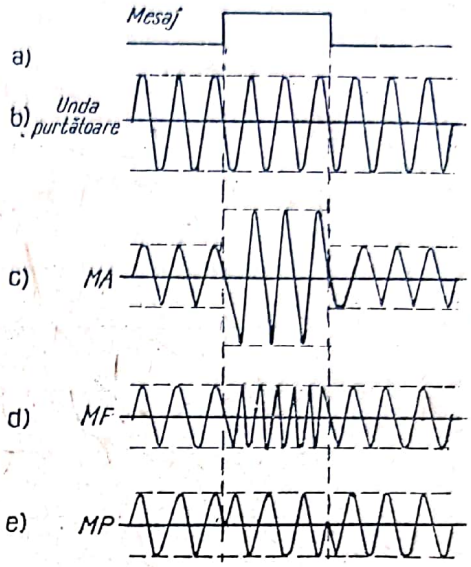


Fig. 1,5. Modularea semnalelor sinusoidale

a – mesajul de transmis; **b** – unda purtătoare; **c** – undă modulată în amplitudine; **d** – undă modulată în frecvență; **e** – undă modulată în fază

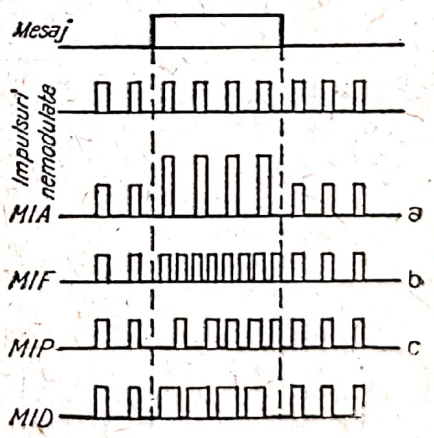


Fig. 1,6. Modulare în impulsuri

a – modularea impulsurilor în amplitudine; **b** – modularea impulsurilor în fază; **c** – modularea impulsurilor în poziție; **d** – modularea impulsurilor în durată

Scanned with OKEN Scanner

rul vizual, această cuantizare se face la intervale de aproximativ 1/10 sec.

În legătură cu modulația semnalelor în impulsuri, în figura 1,8 se prezintă un nou mod de reprezentare a semnalelor. Este vorba de *modularea în cod*. În acest sistem,

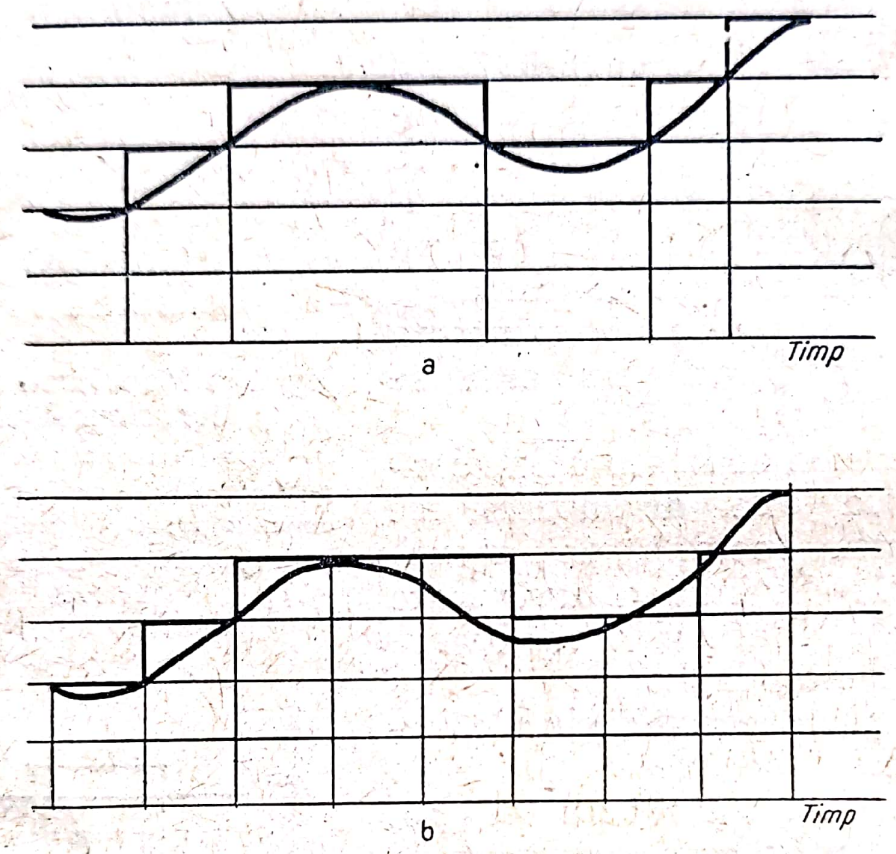


Fig. 1,7. Cuantizarea semnalelor
a – la nivele date; **b** – la momente date

din mărimea primitivă se extrag *eșantioane* cuantizate, la anumite intervale de timp. Valoarea acestor eșantioane se exprimă apoi în cod binar, adică într-un sistem de scriere care nu utilizează decît două numere — fie ele 0 și 1. Se face convenția ca lui 0 să-i corespundă absența unui impuls, iar lui 1 prezența unui impuls. Se ajunge astfel la exprimarea amplitudinii eșantioanelor prin grupuri de impulsuri standardizate, avînd toate aceeași amplitudine.

Menționăm, în fine, un ultim sistem de modulație, anume *modulația delta*. În acest sistem se cuantizează

semnalul, după care se transmite pe linie numai informația cu privire la variația mărimii cuantizate (fig. 1,9).

Și în sistemele nervoase se întîlnesc uneori fenomene analoge modulării delta. Este vorba de așa-numitele sis-

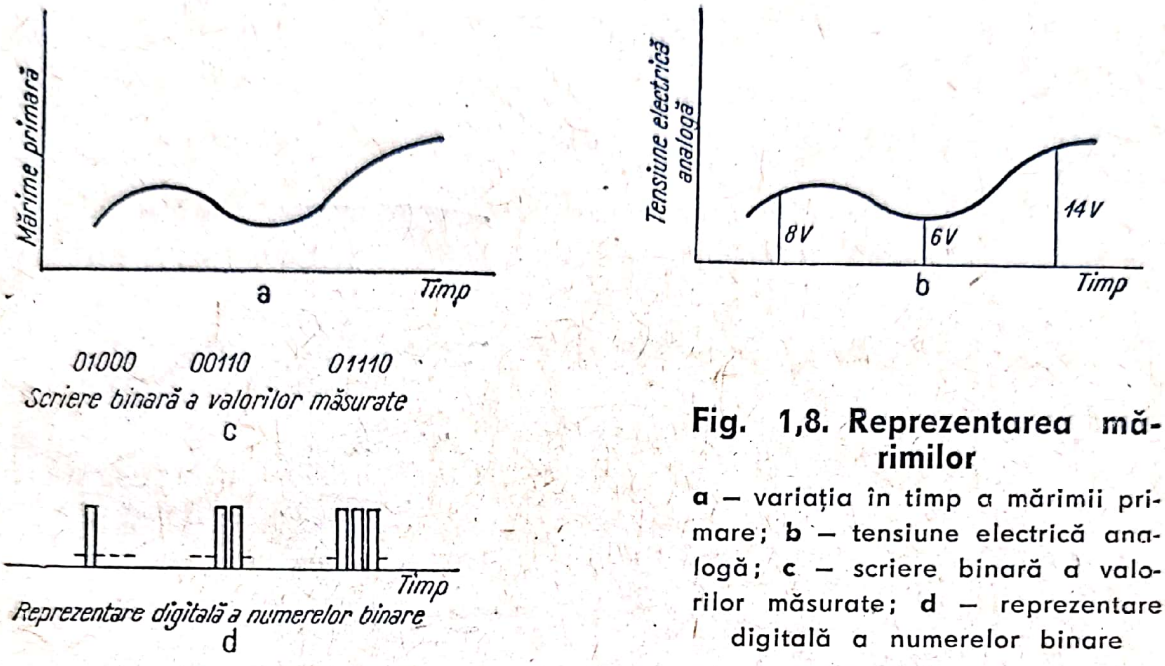


Fig. 1,8. Reprezentarea mărimilor

a — variația în timp a mărimii primare; **b** — tensiune electrică analogă; **c** — scriere binară a valorilor măsurate; **d** — reprezentare digitală a numerelor binare

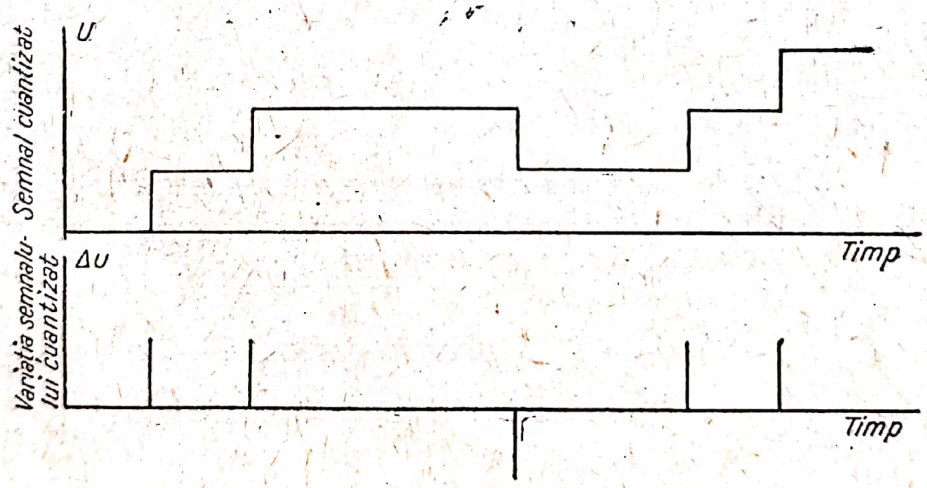


Fig. 1,9. Sistem de modulație delta

sus — semnal cuantizat; **jos** — variația în timp a valorii semnalului cuantizat

teme ON și OFF, care, atunci cînd la intrare li se aplică un semnal sub forma unui impuls dreptunghiular, produc răspuns la ieșire numai la începutul — respectiv sfîrșitul — acestui impuls.

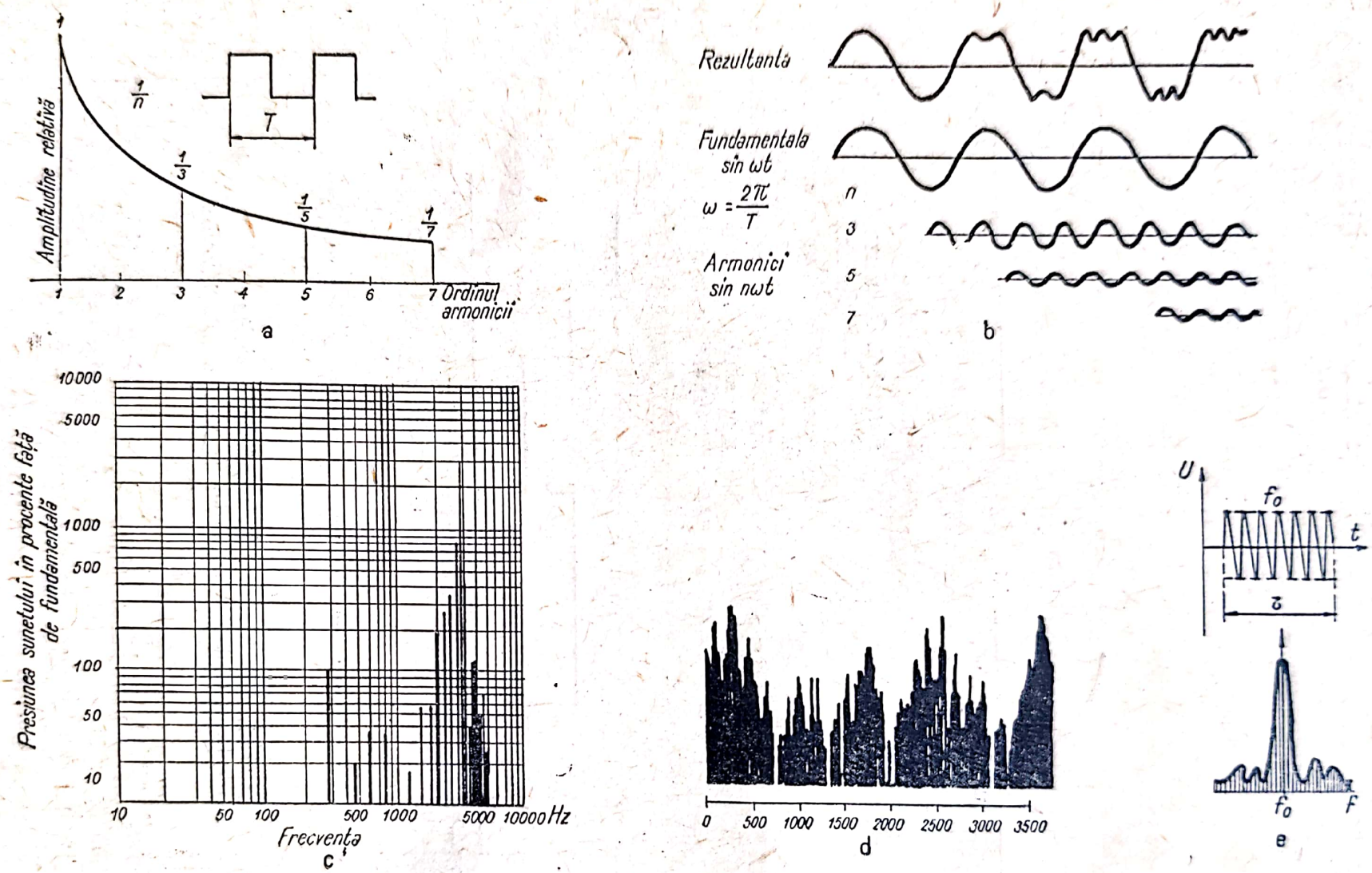


Fig. 1,10. Descompunerea semnalelor periodice

a – semnal periodic dreptunghiular și amplitudinea relativă a armonicilor; **b** – compunerea unui semnal dreptunghiular din armonicile sale; **c** – spectrul unui semnal produs de un claxon; **d** – spectrul unei vocale; **e** – impuls de radiofrecvență și spectrul său

Scanned with OKEN Scanner

În legătură cu teoria generală a semnalelor este necesar să amintim că, așa cum arată o teoremă datorită matematicianului Fourier, orice *semnal periodic* poate fi considerat ca rezultînd din suprapunerea unui număr suficient de mare de sinusoide, avînd fiecare amplitudini alese convenabil și frecvențe multiple ale frecvenței *fundamentale*. În unele cazuri numărul acestor componente — denumite *armonici* — poate fi infinit. Cum însă în practică toate sistemele de comunicație lasă să treacă numai frecvențe mai mici de o anumită valoare, rezultă că și armonicile ce redau semnalele reale sînt cu *frecvența limitată*.

În figura 1,10 se reprezintă compunerea unui semnal dreptunghiular din armonicile componente și *spectrul semnalului*.

Prin *spectrul unui semnal* se înțelege mulțimea elementelor armonice sinusoidale care prin compunere dau semnalul inițial.

Deoarece toate semnalele întîlnite în practică trec prin canale cu bandă limitată, ele vor avea un spectru limitat între o frecvență minimă posibilă și una maximă.

Domeniul semnalului este ocupat, de acel interval, care se situează între cea mai joasă și cea mai înaltă frecvență întîlnită în semnalul respectiv.

Domeniul de frecvență nu este propriu numai semnalelor periodice, ci caracterizează și semnalele neperiodice.

O altă teoremă, datorită tot lui Fourier, arată că și orice *semnal neperiodic* poate fi reprezentat prin suprapunerea unor sinusoide. În acest caz însă, spectrul semnalului nu mai este discret, ca în cazul semnalelor periodice, ci este un spectru continuu, astfel că numărul componentelor este foarte mare (mulțimea componentelor spectrale are puterea continuului), în sensul că oricît de aproape de o armonică se găsește o altă armonică de valoare finită.

O teoremă importantă arată că atunci cînd un semnal are spectru limitat, adică el poate fi reconstituit din semnale avînd cel mult o anumită frecvență maximă F, el poate fi reconstituit pe deplin din *eșantioane* extrase din semnalul respectiv la intervale de timp distanțate între ele prin cel mult $1/2F$.

Scanned with OKEN Scanner

În figura 1,11 se arată un semnal cu spectru limitat (fig. 1,11 *a*), eșantioanele extrase din acesta (fig. 1,11 *b*), redarea acestor eșantioane prin acea parte care se obține eliminînd din spectrul lor frecvențele mai mari decît F (fig. 1,11 *c*) și, în fine, semnalul reconstituit din aceste semnale cu spectru limitat (fig. 1,11 *d*).

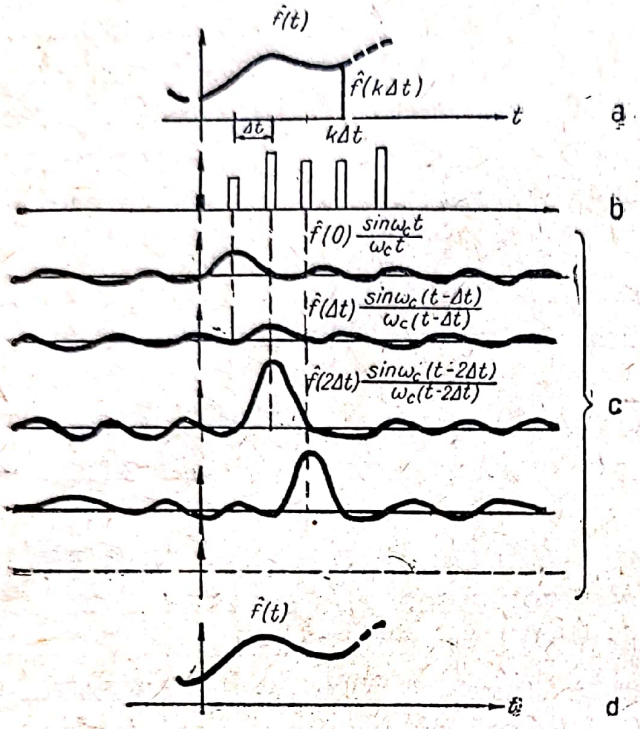


Fig. 1,11. Ilustrarea teoremei eșantionării

a – variația în timp a unui semnal cu spectru limitat; **b** – eșantioane echidistanțate din semnalul dinamic; **c** – semnale cu spectru limitat corespunzînd eșantioanelor din **b**; **d** – semnal rezultat din compunerea semnalelor din **c**

În ceea ce privește comunicațiile în general, indiferent de faptul că utilizează un alfabet finit sau unul infinit, se pune în evidență așa-numitul *volum al mesajului*.

Volumul mesajului este determinat într-un spațiu cu trei dimensiuni, dintre care una este timpul. Este evident că orice mesaj este un fenomen temporal, deci pe axa timpului el va fi prezent între limitele t_1 și t_2, între care are loc transmiterea acelui mesaj.

A doua axă este cea a frecvențelor; mesajul ocupă pe ea un domeniu egal cu spectrul semnalului transmis.

Pe cea de-a treia axă se reprezintă raportul dintre *semnal, zgomot* și *perturbații* sau, cum se numește în cibernetică cu un termen generalizat — dintre *semnal* și *zgomot* evaluate ambele în putere.

În timp ce primele două axe — a timpului și a frecvenței — se reprezintă la scară liniară, axa a treia se reprezintă la scară logaritmică.

Scanned with OKEN Scanner

În general, pentru a se asigura o bună transmitere a semnalelor, este necesar ca intensitatea semnalului util să fie mare în raport cu intensitatea perturbațiilor sau — după cum se spune în mod curent — raportul semnal/zgomot să fie mare.

Să considerăm cazul unui mesaj scris într-un alfabet de lungime 2, literele fiind 0 și 1. Dacă perturbațiile sînt foarte mari, atunci este posibil ca transmițînd un zero să se recepționeze un 1 și invers.

În acest caz, nu mai are sens să recepționăm mesajul, deoarece nu-l putem interpreta corect.

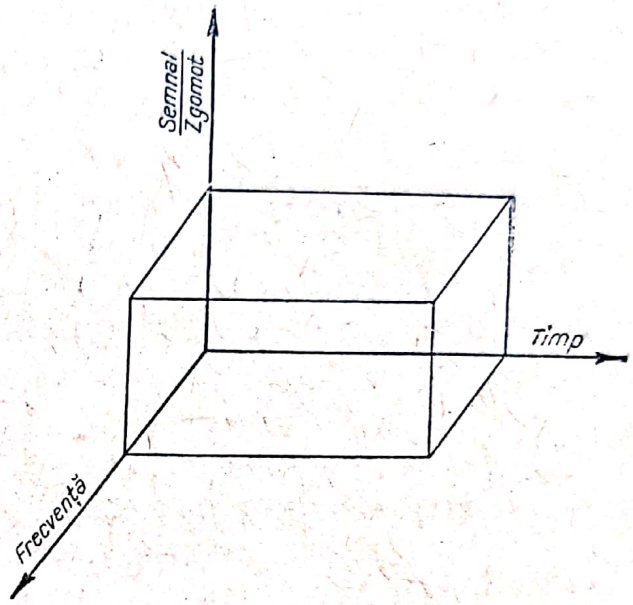


Fig. 1,12. Paralelipiped asociat unui semnal și denumit „volumul semnalului"

Pentru evaluarea raportului semnal/zgomot se utilizează o scară logaritmică, în care în loc să se lucreze cu intensitatea S a semnalului și cu intensitatea N a zgomotului, se lucrează cu logaritmul acestui raport, mărime exprimată de obicei în decibeli (prescurtat db).

Măsura în decibeli a unei mărimi a se definește ca fiind proporțională cu logaritmul raportului dintre mărimea a, pe care o măsurăm, și o mărime fundamentală a_0, luată ca mărime de referință

$$k \lg_{10} \frac{a}{a_0}.$$

Factorul k are valori diferite, după natura mărimii a; dacă a este de natura unei puteri, atunci $k = 10$; dacă a este de natura unei forțe, a unei tensiuni sau a unui curent, atunci $k = 20$.

Scanned with OKEN Scanner

Amintim că în cazul semnalelor electrice, puterea se definește prin produsul dintre tensiune și intensitatea curentului.

În general, puterea se exprimă sub forma unui produs de doi termeni. De exemplu, în mecanică este produsul dintre forță și viteză, în acustică produsul dintre presiunea acustică și viteza de deplasare etc.

Conform celor arătate, dacă ne raportăm la presiune, vom întrebuința altă definiție a decibelului decît atunci cînd ne vom referi la măsurarea puterii acustice.

Volumul mesajului este așadar un paralelipiped reprezentat în spațiul abstract, avînd trei axe de coordonate: timp, frecvență și raportul semnal/zgomot. Se demonstrează că acest volum nu se modifică în cursul transmiterii unui mesaj.

Este ușor să înțelegem, așadar, că atunci cînd încercăm printr-un procedeu oarecare să deformăm acest volum figurativ, modificarea uneia dintre laturi atrage după sine și modificarea cel puțin a unei alte laturi, astfel încît volumul paralelipipedului figurativ să rămînă constant.

Dacă, de exemplu, semnalul se înregistrează pe bandă de magnetofon la o viteză normală, încercînd să dublăm viteza la reproducere, evident că durata redării se va înjumătăți, dar totodată frecvența maxim transmisă se va dubla, astfel încît volumul paralelipipedului figurativ rămîne constant.

Aceste cunoștințe introductive ne-au făcut să înțelegem în mod intuitiv noțiunile de bază ale ciberneticii: sistem, semnal, cantitate de informație. În cele ce urmează, aceste noțiuni se vor aplica la studiul sistemului nervos, începînd cu elementul de bază, anume cu neuronul.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul II

NEURONUL

II, *1. Generalități*. 1. Elementul de bază, morfologic și funcțional, al sistemului nervos central și periferic este reprezentat de *celula nervoasă* (*neuronul*).

După aproape 80 de ani de cercetări de istologie optică și electronică s-a impus concepția care consideră că structura sistemului nervos este aceea a unui ansamblu de celule nervoase interconectate *prin contiguitate*, iar nu prin continuitate, constituind o rețea funcțională extrem de complexă, alcătuită din elemente celulare morfologic independente.

Această concepție, întrevăzută de Hiss (1886) și Forel (1887), s-a conturat în urma cercetărilor lui Kölliker, Lugaro, Nageotte, Tello și alții. Waldeyer (1891) a denumit celula nervoasă *neuron* și, de atunci, concepția amintită este cunoscută sub denumirea de *teoria neuronală*. Santiago Ramon y Cajal a adus cea mai riguroasă demonstrație istologică a teoriei neuronale.

Unele încercări ale lui Gerlach, Apathy, Bethe, Held, Boecke, Schröder ș.a., de a demonstra că în sistemul nervos neuronii interconectați alcătuiesc structuri morfologice continue, nu au rezistat unei sistematice analize istologice. Microscopia electronică modernă a adus argumente indiscutabile în favoarea teoriei neuronale și împotriva teoriilor reticulare.

2. Progresul tehnicilor microscopice (Nissl, Golgi, Bielschowsky, Spielmeyer etc.), apariția microscopiei electronice și dezvoltarea biochimiei și istochimiei au permis cunoașterea neuronului. Contribuția școlii românești în acest sens este remarcabilă. Lucrarea *La Cellule nerveuse* a prof. Gh. Marinescu, deși are peste 50 de ani de la apariție, este

Scanned with OKEN Scanner

încă utilă celor care vor să studieze neuronul. Mai amintim că lucrări valoroase în această direcţie au publicat şi I. Minea, I. T. Niculescu, Th. Horneţ ş.a.

În linii mari, se ştie că neuronul, aşa cum apare în impregnările cu argint (fig. 2,1), se compune dintr-un corp (denumit somă, pericarion, citon), din prelungirile dendritice şi prelungirea axonală, cu ramificaţiile ei colaterale şi terminale.

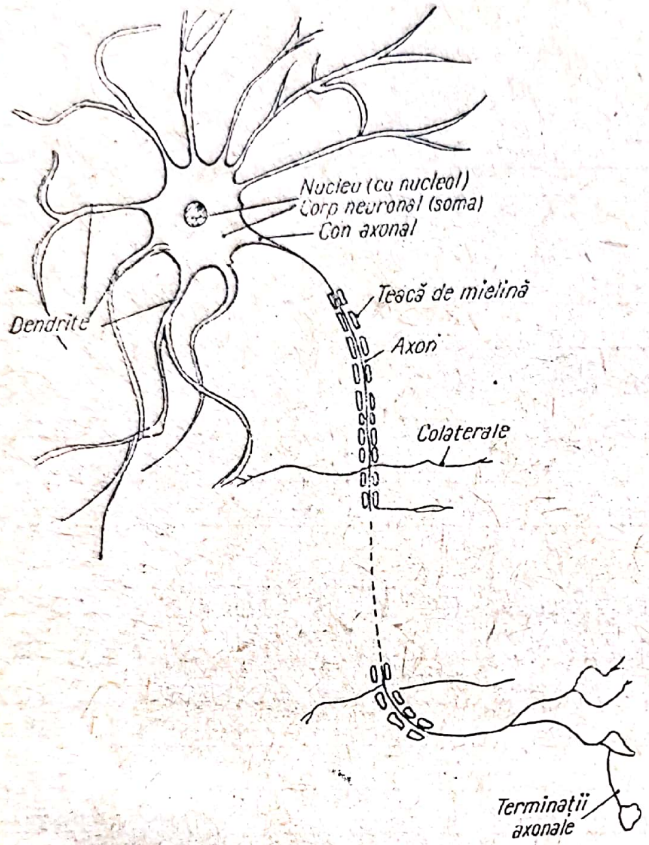


Fig. 2,1. Neuron. Schemă morfologică

Se ştie că diametrul somei neuronale poate varia la mamifere de la cîţiva microni (celula granulară din cerebel) pînă la 100 μ (celula lui Betz). De asemenea, prelungirile dendritice şi axonale pot fi extrem de variate, cele din urmă atingînd lungimi de peste 1 m (axonul celulelor piramidale corticale).

După dimensiunile relative şi organizarea spaţială a diferitelor componente ale neuronului, se pot distinge mai multe tipuri morfologice (fig. 2,2).

În cele ce urmează ne vom referi la neuronul Golgi I, care poate fi considerat drept cel mai tipic. Apoi vom aplica — în măsura în care lucrul este necesar — concluziile noastre la alte tipuri neuronale. Este probabil că fiecărui tip morfologic de neuron îi corespunde un mod propriu de a funcţiona, deci de a prelucra şi transmite informaţiile.

3. Neuronul, ca orice structură vie, prezintă o organizare energetică ce se bazează pe schimburi de substanţe chimice cu mediul perineuronal în cadrul metabolismului.

Scanned with OKEN Scanner

Acesta asigură funcţionarea celulei nervoase, conservarea structurii ei, creşterea (în perioada de organogeneză) şi repararea ei (în caz de leziuni).

De asemenea, se bucură de proprietatea de iritabilitate, care este capacitatea oricărei materii vii de a-şi schimba starea în urma acţiunii unui agent exterior oarecare.

Această proprietate este dezvoltată la maximum în celula nervoasă şi îi conferă acesteia rolul ei special în organism. Ea stă la baza *excitabilităţii* şi a *conductibilităţii*. Acestea sînt cele două funcţiuni fundamentale specifice ale neuronului. Ele au un aspect energetic şi unul cibernetic de care ne vom ocupa îndeaproape.

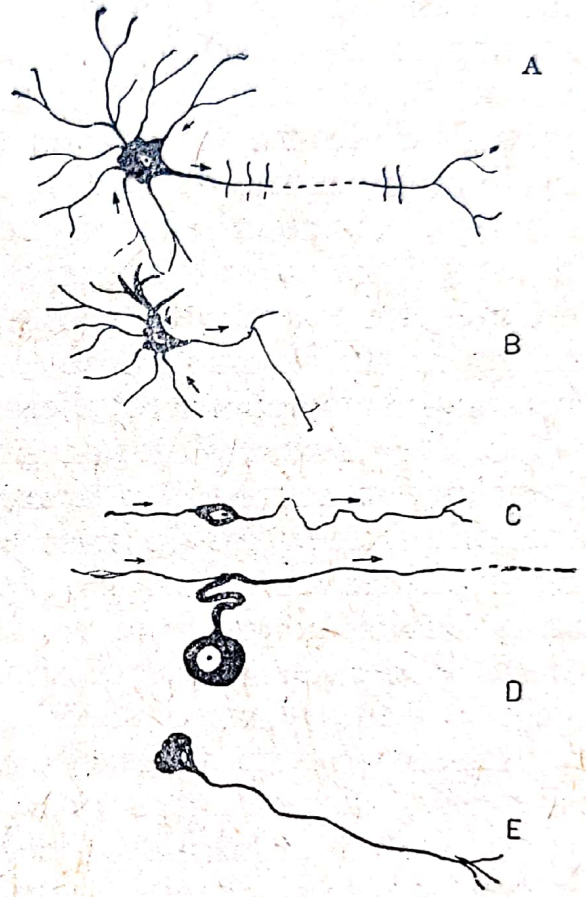


Fig. 2,2. Tipuri de neuroni
A – neuron tip Golgi I; **B** – neuron tip Golgi II; **C** – neuron bipolar; **D** – neuron spinal (unipolar); **E** – neuron unipolar

4. a. Din punct de vedere biofizic, neuronul este un gel coloidal, în care faza dispersantă este o soluţie apoasă de ioni şi de micromolecule organice (hidraţi de carbon, aminoacizi, produşi ai metabolismului intermediar, lipide etc.), iar faza dispersată este reprezentată de complexe proteice sau lipoproteice integrate într-o reţea tridimensională. Printre ele se găsesc enzimele, care sînt esenţiale metabolismului celular, şi nucleoproteinele, care intervin în biosinteza proteinelor, dar care s-ar putea să joace un rol în dinamica funcţională a neuronilor. Potrivit acestui rol, ele ar putea condiţiona anumiţi parametri ai neuronului, ca pragul de excitaţie etc. După unele ipoteze, ele ar interveni (indirect) în fenomenele de memorie neuronală. Acest

gel nu are o constituție omogenă, proteinele și lipidele prezentînd concentrații și aranjamente (orientări) spațiale diferite în diferitele porțiuni ale celulei, ceea ce duce la organizarea unor dispozitive membranare ultramicroscopice (membrana plasmatică, sistemul reticulat endoplasmic, mitocondrii, veziculele endocelulare, membrana nucleară etc.) și dispozitive fibrilare cu un diametru de 100 Å (Hess și Lausing). Dintre acestea, dispozitivele fibrilare (care sînt protofibrilele fibrilelor microscopice) par a avea un rol exclusiv mecanic, determinînd rezistența fibrelor nervoase; dispozitivele membranare endoneuronale au un rol în metabolism, fiind suprafețe active pe care sînt așezate diferitele enzime, cu o anumită geometrie funcțională, și au probabil un rol în fenomenul de excitație și conducere, iar membrana plasmatică are rolul esențial în cibernetica neuronală.

b. Membrana plasmatică sau membrana neuronală este un concept heuristic ce aproximează destul de bine evenimentele fizice care definesc activitatea funcțională la periferia celulei nervoase. Datele de morfologie fină arată că, într-adevăr, la periferia neuronului se află o zonă de frontieră a citoplasmei, care reprezintă o condensare locală a gelului protoplasmic (Szöstrand).

Membrana nu trebuie considerată un fel de sac, rigid și pasiv, dispus între protoplasmă și mediul pericelular (cum ar fi membrana celulelor vegetale). Ea este o parte a protoplasmei, deci o structură complexă dinamică (la nivelul căreia au loc procese energetice), ce prezintă proprietăți speciale. În general, se consideră că are o grosime de 200—300 Å (ceea ce corespunde datelor morfologice și unor proprietăți electrice) și în grosimea ei prezintă un gradient de concentrare de la interior spre exterior.

Membrana interpusă între soluția apoasă endocelulară și soluția apoasă exocelulară trebuie străbătută în ambele sensuri de diferite substanțe. Apa străbate membrana prin difuziune (Lönstrup și Pigon). Moleculele dizolvate în apă străbat membrana tot prin difuziune, deci supunîndu-se legii lui Fick:

$$\frac{1}{a}\frac{dn}{dt} = -D\frac{dc}{dx} \qquad (2,1)$$

Scanned with OKEN Scanner

în care a este suprafaţa considerată, n — numărul moleculelor care au trecut în timpul t, c — concentraţia substanţei, iar x — distanţa în profunzime în lungul căreia s-a făcut difuziunea. Factorul de proporţionalitate D depinde de mărimea moleculelor considerate. Aceasta a dus la elaborarea conceptului de *membrană sită* (Ruhland şi Collander) sau *membrană cu pori*. Pentru o serie de substanţe s-a văzut însă că probabilitatea trecerii prin membrană nu este descrisă corect de relaţia (2,1) : intervine coeficientul de solubilitate al moleculelor respective în lipidele din membrană. În felul acesta, s-a ajuns la conceptul de permeabilitate prin solubilizare în lipide (Overton). Deoarece la o aceeaşi celulă s-au constatat ambele tipuri de trecere prin membrană, s-a ajuns la conceptul de *membrană mozaic*, potrivit căruia în membrană sînt juxtapuse porţiuni lipidice şi porţiuni poroase.

Electroliţii străbat şi ei încontinuu membrana neuronală. Fluxul ionilor K^+, Na^+, Cl^- a fost studiat cu elemente radioactive (Conway şi Keynes). Aceste cercetări au pus în evidenţă trei fapte fundamentale. În primul rînd, există un flux continuu de ioni în ambele sensuri. În al doilea rînd, ionii trec selectiv. Aceasta implică o organizare structurală foarte complexă a membranei şi intervenţia unor procese energetice. Trecerea selectivă ar depinde de anumite proprietăţi fizice (o structură în sită, cu o orientare şi o dimensionare specială a porilor-Schäefer) sau chimice (afinităţi chimice ale ionilor pentru diferitele molecule care constituie membrana sau componentele mai profunde ale gelului protoplasmic — Beutner, Teorell, Ussing). Selectivitatea aceasta, indiferent de mecanism, nu este rigidă, ea se schimbă în anumite condiţii (probabil prin modificări la nivel molecular în membrană). Această schimbare stă la baza excitabilităţii şi conductibilităţii neuronale. În al treilea rînd, trecerea ionilor prin membrană nu urmează riguros legile difuziunii. Ionii trec adesea împotriva unui gradient de concentrare. Aceasta a făcut ca şcoala din Cambridge (Hodgkin şi Huxley) să postuleze existenţa în membrană a unor mecanisme energetice (numite *pompe ionice*), care ar asigura trecerea ionilor nu în mod pasiv,

Scanned with OKEN Scanner

ci cu consum de energie. Mecanismul acestor pompe nu este cunoscut. S-a demonstrat că la baza acestor pompe ar interveni fosfatidele din membrană care am văzut că reprezintă un sistem generator de energie. Pentru pomparea unui ion de Na^+ se consumă energia a patru molecule de ATP (acid trifosforic).

Aceste trei fapte asigură repartiţia ionică diferită între mediul apos endocelular şi cel exocelular. Există astfel o acumulare a potasiului în mediul endocelular faţă de cel exocelular şi o repartiţie inversă a sodiului. De exemplu, în fibra mielinică de broască, concentraţiile ionice sînt în repaus:

	În interior	În exterior
K^+	= 110 mM	2,6 mM
Na^+	= 37 mM	110 mM
Cl^-	= urme — 40 mM	77 mM

Dat fiind că există o circulaţie permanentă de ioni, cifrele reprezintă o situaţie statistică.

Din cele de mai sus rezultă că energetica neuronală condiţionează (prin structura organică şi dinamică a unor compuşi) structura electrolitică a protoplasmei neuronale.

II, *2. Excitaţia*. 1. Materia vie neuronală, cu toată complexitatea ei structurală, cu toate reacţiile biochimice multiple, care o definesc, şi cu tot schimbul permanent de substanţe existent între celulă şi mediul exocelular, prezintă în condiţii de repaus o stare staţionară, atît pe plan structural (organizarea la toate treptele se menţine constantă, cu toate că elementele constitutive se schimbă în permanenţă), cît şi pe plan energetic.

Cea mai importantă caracteristică neuronală este reprezentată de proprietăţile electrice ale neuronului. Tehnicile moderne de fiziologie — în special folosirea microelectrozilor din micropipete capilare (Lang şi Gérard) — au îngăduit o analiză aproape exhaustivă a electrofiziologiei neuronale.

Scanned with OKEN Scanner

În condiții de repaus s-a stabilit că membrana neuronală are o rezistență de 2000—12 000 Ω/cm, cu o capacitate de 1—3 μF/cm² și o constantă dielectrică relativă de 3—6. De asemenea, s-a stabilit că membrana este polarizată permanent, avînd suprafața exterioară încărcată pozitiv, iar cea interioară negativ. Diferența de potențial dintre cele două suprafețe constituie potențialul transmembranar de repaus și are o valoare de 70 — 90 mV (Hodgkin A. L., Huxley A. F. și Katz B.). O schemă electrică echivalentă a membranei se redă în figura 2,3.

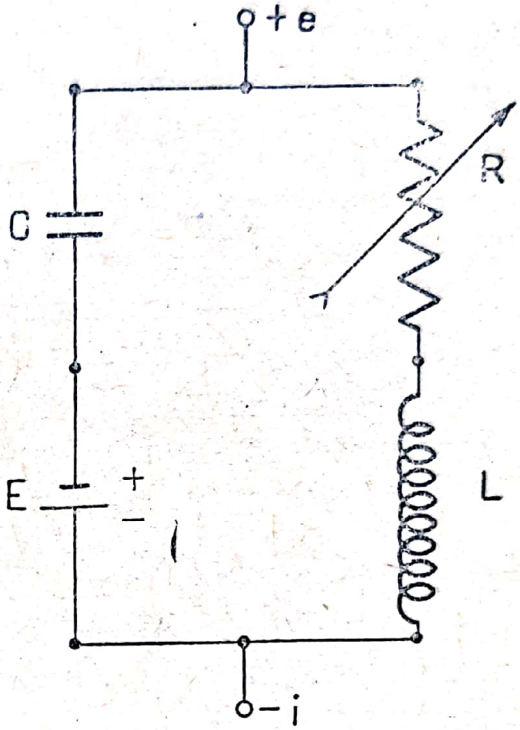


Fig. 2,3. Schema electrică echivalentă a membranei neuronale

e — exteriorul mebranei; i — interiorul mebranei; c — condensator; E — forța electromotrice; R — rezistență; L — inducție

Diferența aceasta de potențial este menținută datorită structurii neuronale și energeticii sale. Marea majoritate a autorilor sînt de acord că la baza ei se află un mecanism ionic.

Se știe că în cazul a două soluții ionice de concentrație diferită separate printr-o membrană, aceasta se polarizează atît prin diferența de concentrație în cele două soluții ale aceluiași ion, cît și prin diferența de mobilitate prin membrană a ionilor diferiți. În felul acesta, potențialul de membrană este un potențial de concentrare însumat cu un potențial de difuziune chimică.

Am văzut că există diferențe de concentrații între Na^+ și K^+. De asemenea, există și diferențe între vitezele lor de difuziune. În membrana în repaus, raportul vitezelor de difuziune a K^+ și Na^+ este de 20 (pe cînd în soluții, raportul este de 3/2).

Valoarea potențialului de membrană se poate calcula folosind formula lui Nernst și variantele ei. Pentru poten-

țialul de membrană de repaus se poate folosi varianta lui Goldman

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K(K^+)_{in} + P_{Na}(Na^+)_{in} + P_{Cl}(Cl^-)_{in}}{P_K(K^+)_{ex} + P_{Na}(Na^+)_{ex} + P_{Cl}(Cl^-)_{ex}} \qquad (2,2)$$

în care E este diferența de potențial transmembranară;
R — constanta gazelor (8,31 J/mol);
F — constanta lui Faraday ($9{,}65 \times 10^4$ C/mol);
T — temperatura absolută;
P_K, P_{Na} și P_{Cl} reprezintă permeabilitățile membranei pentru ionii respectivi;
$(A)_{in}$ — concentrația ionului A în interior;
$(A)_{ex}$ — concentrația ionului A în exterior.

Calculul și datele experimentale s-au suprapus, ceea ce dovedește că teoria ionică a potențialului de membrană este în concordanță cu realitatea.

Amintim că fenomenele electrice neuronale au putut fi explicate și printr-o teorie ionică, care nu face apel la conceptul de membrană neuronală: este teoria distribuției ionice prin fenomene de difuziune în toată masa protoplasmică (Teorell).

De asemenea, aceste fenomene electrice au fost explicate prin ipoteze care nu țin seama de mecanismul ionic. Astfel, s-a emis ipoteza proteică (Nassonov și Alexandrov), care face apel numai la proprietățile macromoleculare ale protoplasmei, și ipoteza oxidoreductoare (Chalazonites și Arvanitaki), care considera electrogeneza drept un fenomen legat de un aranjament spațial special al oxidazelor și al transportorilor electronici (citocromilor) în citoplasmă.

2. În anumite cazuri, dacă se aplică un agent exterior, celula nervoasă poate fi scoasă din starea ei staționară. Noua stare constă într-o remaniere a energeticii și structuralității neuronului. Elementul fundamental al acestei remanieri are loc la nivelul membranei care-și schimbă (în mod dinamic și tranzitoriu) permeabilitatea față de ioni, ceea ce determină o serie de evenimente electrice, care pot fi înregistrate și care constituie testul cel mai expresiv al noii stări.

Scanned with OKEN Scanner

Agentul exterior, capabil să scoată celula din stadiul staționar de repaus, se numește *excitant*, noul stadiu morfofuncțional al neuronului se numește stare de *excitație*, iar evenimentele electrice înregistrate constituie *potențialul de acțiune*.

Agentul exterior poate fi un excitant electric sau unul chimic. El trebuie să fie capabil să remanieze suficient proprietățile membranei neuronale, pentru ca să determine o modificare a permeabilității ei selective.

Agenții chimici (de exemplu acetilcholina) acționează pe anumite porțiuni ale membranei neuronale (membranele post sau subsinaptice), care sînt electric inexcitabile (Eccles). Agenții electrici acționează pe restul membranei neuronale (care este chimic inexcitabilă). Membrana neuronală electric excitabilă prezintă și ea regiuni cu două compartimente diferite: regiunea somatodendritică și cea axonală, așa cum vom vedea mai departe.

Abordarea cantitativă a fenomenului de excitație se poate face stabilind o relație între intensitatea curentului excitant și intensitatea potențialului de acțiune provocat: este calea pe care am folosit-o.

Cercetările lui Hodgkin, Rosenblueth, Stämpfli, Bishop ș.a. au precizat că aplicînd un excitant electric pe membrana neuronală se obține o modificare a permeabilității acesteia pentru sodiu, printr-o acțiune încă inexplicată a curentului asupra structurii dinamice a membranei. Ionii de Na^+ pătrund în celulă. Fluxul ionic (de Na^+) astfel creat (și constatat cu sodiu radioactiv) determină o modificare a proprietăților electrice ale membranei somatice sau dendritice. Această modificare se traduce prin potențialul de acțiune local, a cărui intensitate este o funcție logaritmică a intensității curentului excitant (fig. 2,4). Deci, ne găsim în fața unui potențial gradat. Am văzut că relația între diferențele de potențial dintre cele două fețe ale unei membrane și concentrațiile ionice care o generează este de tip logaritmic (cf. relația (2,3)). De asemenea, experimentul a confirmat cele de mai sus. Notînd cu $s(t)$ variația în timp a voltajului curentului excitant (considerat ca semnalul de intrare în neuron) și prin $A(t)$ variația

Scanned with OKEN Scanner

potențialului de acțiune local, avem relația de bază a excitației:

$$A(t) = K \ln s(t) + m, \qquad (2,3)$$

cu condiția ca $s(t) \geqslant h$;
în care: K este un factor de proporționalitate;
m — potențialul de membrană de repaus;
h — pragul de excitabilitate al membranei neuronale.

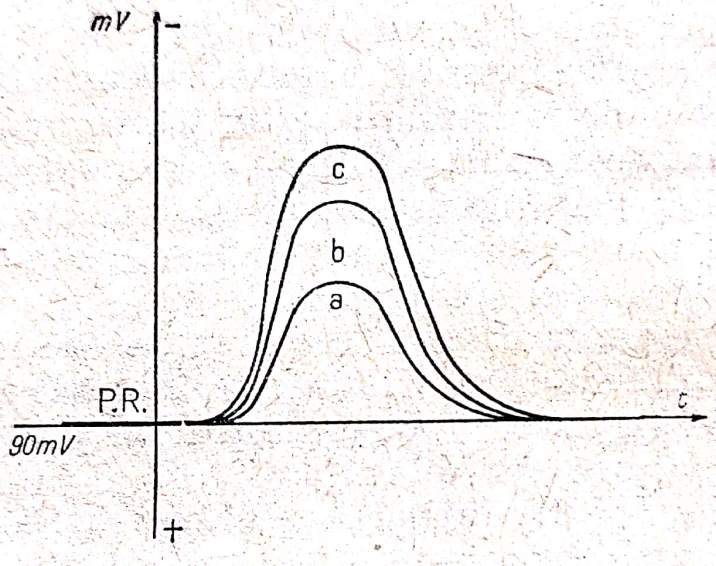


Fig. 2,4. Potențialul gradat de acțiune

Deci, membrana somatodendritică traduce analogic prin logaritmare mărimea semnalului excitant.

Relațiile în timp între $s(t)$ și $A(t)$ sînt destul de complexe (fig. 2,5).

Dacă $s(t)$ durează de la t_0 la t_1, fenomenul electrotonic $A(t)$ începe cu o întîrziere η (timpul de excitație), deci la momentul $t_0 + \eta$, și încetează după t_1, realizînd un postefect, care durează de la t_1 la t_2. Acest postefect include decalajul în timp η între $s(t)$ și $A(t)$, dar cuprinde și procesul de revenire a membranei (a dimamicii neuronale) la starea de repaus, care nu este instantaneu. Acest proces (care constituie post-efectul propriu-zis) reprezintă perioada activă, în cursul căreia mecanismele energetice ale pompelor ionice restabilesc potențialul de repaus. Înregistrările grafice ne dau o curbă exponențială a postefectului, ceea

ce este în concordanță cu faptul general că fenomenele biochimice din organism variază exponențial în timp. Din cele de mai sus rezultă că relația (2,3) este valabilă de la $t_0 + \eta$ la $t_1 + \eta$, iar de la $t_1 + \eta$ la t_2 avem:

$$A(t) = A_M \exp\ (-t/\tau), \qquad (2,4)$$

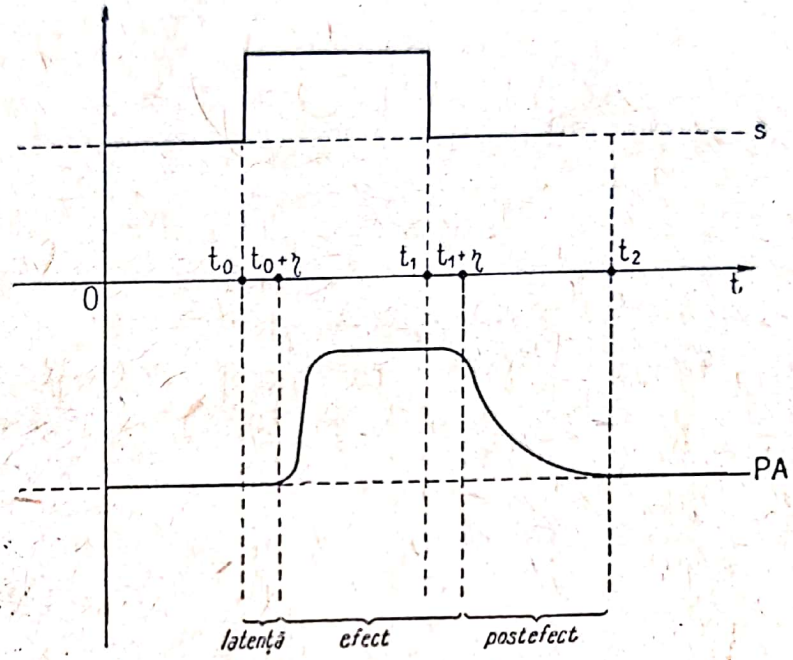


Fig. 2,5. Relațiile în timp între curentul excitant (semnal) și potențialul de acțiune (răspuns)

în care A_M este amplitudinea răspunsului electrotonic la momentul $t_1 + \eta$, iar τ este o constantă de timp a membranei neuronale, care poate varia eventual în funcție de anumiți factori humorali sau structurali.

Expresia completă a potențialului de acțiune a membranei somatodendritice este

$$A(t) = \begin{cases} m & t < t_0 + \eta\ ;\ t > t_2 \\ K\ \ln s(t) + m & t_0 + \eta < t < t_1 + \eta \\ A_M \exp\ (-t/\tau) + m & t_1 + \eta < t < t_2 \end{cases} \qquad (2,5)$$

S-a arătat că la nivelul dendritelor τ este mai mare decît la nivelul somei, ceea ce dă postefecte de circa zece ori mai mari (Fessard).

Scanned with OKEN Scanner

Postefectul reprezintă o primă formă de memorie scurtă a neuronului.

Deci, desfășurarea potențialului de acțiune gradat este complexă și depinde de un element exterior $s(t)$ (semnalul de intrare) și de o serie de elemente interne (K, m, τ). În cazul unui stimul inhibitor, forma ecuațiilor nu se schimbă. Se schimbă doar semnul lui A și valoarea diferitelor constante.

3. S-au dat și alte modele matematice ale fenomenului de excitație. Se pornește de la ipoteza că un excitant electric de intensitate s generează în neuron o variație cantitativă a unui factor ipotetic de excitare ε. Cînd acesta depășește un anumit prag h, factorul ε determină starea de excitație a neuronului. Modelele matematice stabilesc relația dintre s și ε. În acest sens există formula lui Haarvey

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = s(t) \exp(-kt) \tag{2,6}$$

care prin integrare dă

$$\varepsilon(t) = \int_0^t s(t) \exp(-kt)dt + \varepsilon_0 \tag{2,7}$$

în care t este timpul, k este o constantă și ε_0 este valoarea factorului de excitație în condiții de repaus al neuronului.

Considerînd factorul ε drept concentrația unei substanțe teoretice, Blair a stabilit relația

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = Ks - k\varepsilon \tag{2,8}$$

care, prin integrare, dă

$$\varepsilon(t) = \exp(-kt)\left\{\varepsilon_0 + K\int_0^t s(t) \exp(-kt)dt\right\} \tag{2,9}$$

Ulterior, s-a luat în considerare că excitantul s determină variația de concentrație a două substanțe teoretice: ε (factor de excitare) și j (factor de inhibiție). Starea de

excitare a neuronului este realizată cînd $(\varepsilon - j) \geqslant h$ şi depinde de $\varepsilon - j$.

S-a ajuns astfel la relaţiile lui Young

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= k_{11}(\varepsilon - \varepsilon_0) + k_{12}(j - j_0) + as \\ \frac{dj}{dt} &= k_{21}(\varepsilon - \varepsilon_0) + k_{22}(j - j_0) + bs \end{aligned} \tag{2,10}$$

în care a, b, k_{il} sînt constante.

Ecuaţiile diferenţiale de mai sus au fost integrate cu un aparat matematic complex.

O variantă simplificată a ecuaţiei lui Young este dată de Rashewsky

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= Ks - k(\varepsilon - \varepsilon_0) \\ \frac{dj}{dt} &= Ms - m(j - j_0) \end{aligned} \tag{2,11}$$

unde K, k, M, m sînt constante.

Prin integrare, pentru un excitant în treaptă, se obţine

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \varepsilon_0 + \frac{Ks}{k}[1 - \exp(-kt)] \\ j(t) &= j_0 + \frac{ks}{m}[1 - \exp(-kt)] \end{aligned} \tag{2,12}$$

Ca o ipoteză fizică se poate admite că ε se referă la concentraţiile ionilor monovalenţi Cl^-, Na^+, şi K^+ şi că j se referă la cele ale ionilor bivalenţi Ca^{++}, Mg^{++}.

Ecuaţiile de mai sus sînt mai complexe decît relaţiile noastre. Ele însă sînt pur teoretice şi nu pornesc de la realitatea biologică. Ele nu descriu întregul fenomen al excitaţiei, deoarece neglijează potenţialul de acţiune, care este mărimea ce exprimă, în fond, starea membranei neuronale.

4. Starea de excitaţie o dată produsă într-un punct i al membranei somatice sau dendritice nu rămîne un fenomen pur local, ci influenţează întreaga suprafaţă a membranei somatodendritice. Aceasta înseamnă că un punct oarecare D de pe suprafaţa membranei, definit de vectorul

Scanned with OKEN Scanner

de poziţie $\bar{r}$, va avea o stare electrică $S(\bar{r}, t)$ care depinde de starea electrică a membranei în punctul excitat $(A_i(t))$, de distanţa dintre i şi D măsurată pe drumul cel mai scurt pe membrană (geodezic) şi de legea propagării influenţei lui i asupra lui D. Starea $S(\bar{r}, t)$ este dată de relaţia

$$S(\bar{r}, t) = A_i(t)\psi(d_i) \qquad (2,13)$$

în care $\psi(d_i)$ exprimă legea propagării excitaţiei pe distanţa de la i la D.

Stabilirea funcţiei $\psi(d)$ se poate face considerînd-o drept o formă a conducerii nervoase (vezi subcapitolul următor). Ea implică o a doua formă de memorie scurtă a neuronului. Ea este reprezentată de durata propagării de la i la D şi în cazul dendritelor lungi reprezintă un element important în desfăşurarea activităţii neuronale.

În cazul în care se excită mai multe puncte pe suprafaţa neuronului, starea $S(\bar{r}, t)$ a unui punct oarecare D depinde de starea tuturor punctelor excitate. Dată intervalul de timp între momentul excitării a două sau mai multe puncte (şi chiar între două excitări succesive ale aceluiaşi punct) nu depăşeşte eficienţa celor două forme de memorie scurtă a neuronului, influenţele respective îşi conjugă efectele în punctul arbitrar D. Avem un fenomen numit *sumaţie*, a cărui expresie este

$$S(\bar{r}, t) = \sum_i A_i(t)\psi(d_i) \qquad (2,14)$$

în care i se referă la toate punctele excitate.

Sumaţia are un aspect spaţial, care se referă la $\psi(d_i)$, şi un aspect temporal, care se referă la laturile temporale ale lui $\psi(d_i)$ şi ale lui $A_i(t)$.

În felul acesta, relaţia (2,14) exprimă starea de excitaţie centrală a neuronului, incluzînd atît fenomenul de excitaţie şi propagarea ei în membrana somatodendritică, cît şi fenomenele de sumaţie temporală şi spaţială, care definesc funcţia integratoare a neuronului (Sherrington).

5. Trecerea excitaţiei prin membrana neuronală nu produce o remaniere structurală complet reversibilă. Complexitatea structurii neuronale (a membranei în primul rînd, dar probabil a ansamblului protoplasmic) este răsco-

Scanned with OKEN Scanner

lită nu numai la nivelul ionic, ci la toate nivelurile supraiacente acestuia (molecular, leptonic, subcelular şi celular). Microscopia a permis să se pună în evidenţă în timpul excitaţiei şi după aceea o creştere a volumului axonului (Hill şi Tobias), a volumului corpului neuronal (Edström) şi modificări ale tinctorialităţii bazofile a neuronului (Mann, Holmes, Einarsson, Marinescu, Hyden). De altfel, este clasică remanierea substanţei lui Nissl după excitaţii puternice şi îndelungate şi unii autori au pus în evidenţă remanieri ale aparatului fibrilar neuronal (Bethe, Peterfi, Klinke, L. de Nô). Galambos aminteşte de modificări în unele dendrite apicale; Abood şi Gérard în aspectul şi distribuţia microsomilor.

Structura geometrică a macromoleculelor este relativ labilă. Este foarte probabil că ea suferă modificări în cursul excitaţiei. În acest sens, un rol însemnat îl joacă nucleoproteinele a căror importanţă în transmiterea mesajelor ereditare este în curs de a fi elucidată şi al căror rol în cursul dinamicii neuronale începe să fie schiţat (Katz şi Halstead). Amintim că Morell şi Krebs au arătat modificarea aranjamentelor de ADN (acid desoxiribonucleic) din citoplasma neuronală în cursul solicitărilor funcţionale ale celulelor nervoase.

Toate aceste structuri se bucură însă de proprietatea de *histerezis*. Cu alte cuvinte, o structură care a suferit o modificare în cursul trecerii neuronului din repaus în stare de excitaţie nu-şi mai revine la starea iniţială sau îşi revine cu o constantă de timp foarte mare (în comparaţie cu evenimentele neuronale). cînd neuronul a trecut din nou în stare de repaus. Un nou excitant va determina o nouă modificare a structurii respective, dar care nu va porni de la starea ei iniţială, ci de la starea ei reziduală. Fenomenul se repetă de fiecare dată.

Aceasta înseamnă că după un număr n de excitări, modificarea reziduală reprezintă suma modificărilor reziduale. Dacă în loc de numărul modificărilor suferite luăm în considerare factorul timp, atunci la momentul t modificarea reziduală este o integrală în funcţie de timp a tuturor modificărilor reziduale suferite de structura

Scanned with OKEN Scanner

respectivă, de la momentul cînd a primit prima excitaţie, pînă la momentul t considerat.

Este evident că fiecare modificare reziduală este proporţională cu răscolirea energetică care a generat-o şi al căror test funcţional este reprezentat de potenţialul de acţiune $A_i(t)$. Fiecare excitaţie impune însă structurilor celulare o modificare reziduală care depinde şi de un factor de pondere ε, care la rîndul lui depinde de o serie de variabile (amplitudinea lui $A_i(t)$, repetarea fenomenului, poziţia spaţială a punctului i de excitaţie, realizarea unor anumite configuraţii temporospaţiale excitante, vîrsta neuronului etc.). S-ar putea să existe chiar un prag — labil — pentru ca $A_i(t)$ să influenţeze structurile endocelulare în măsură suficientă pentru a determina o modificare reziduală.

Deoarece structurile cu histerezis au o distribuţie spaţială în neuroni, starea reziduală totală a unei celule nervoase va fi suma sau integrala tuturor structurilor interesate de la momentul 0 la momentul t. Dacă se consideră că structuri cu histerezis au o distribuţie exclusiv în membrana somatodendritică, atunci starea reziduală totală are expresia:

$$Z = \int\int_{\Sigma\ 0}^{t} A_i(t)\ dt\ d\sigma \qquad (2,15)$$

în care Σ reprezintă suprafaţa membranei somatodendritice, iar $d\sigma$ — elementul de suprafaţă.

Dacă se consideră — cum este mai probabil — că structurile cu histerezis au o distribuţie în tot corpul şi în dendritele neuronului, avem

$$Z = \int\int_{V\ 0}^{t} A_i(t)\ \mathrm{d}t\ \mathrm{d}v \qquad (2,16)$$

în care V este volumul considerat, iar $\mathrm{d}v$ — elementul de volum.

Expresia Z reprezintă memoria de lungă durată a neuronului şi, evident, ea depinde de ciclul de histerezis al fiecărei structuri participante.

De aici rezultă că starea electrică $S(\bar{r}, t)$ a unui punct oarecare D al membranei este o funcţie complexă, care

depinde de excitațiile actuale (Ac) date de relația (2.14) și de excitațiile trecute (Z), date de relația (2,15 sau 2,16), așa că avem :

$$S(\bar{r},\ t) = S(Ac,Z) \qquad (2,17)$$

6. Membrana axonală este și ea electric excitabilă. Comportamentul ei este diferit de al membranei somatice și dendritice. Un curent excitant, aplicat pe membrana axonală, determină — dacă un prim prag h este depășit — un potențial de acțiune local, care are aceleași caracteristici ca în cazul membranei somatice sau dendritice. Precizăm că potențialul de acțiune local nu are importanță pentru cibernetica neuronului. El se mai numește și prepotențial. Constantele de timp sînt însă mai mici (τ, η) ca și pragul h. Dacă însă curentul excitant depășește un al doilea prag p, membrana axonală răspunde brusc printr-un potențial de acțiune numit vîrf (*spike*). Amplitudinea acestuia este o constantă a axonului respectiv. Valoarea ei (110 — 120 mV) este independentă de parametrii excitantului, cu condiția ca pragul p să fie egalat sau depășit. În general, pragul corespunde excitantului care determină un potențial local de 40—50% din valoarea vîrfului. Durata vîrfului este și ea o constantă axonală (0,5 — 2 ms). Întregul fenomen poartă denumirea de *detonare* și cinetica lui este aproximată de expresia

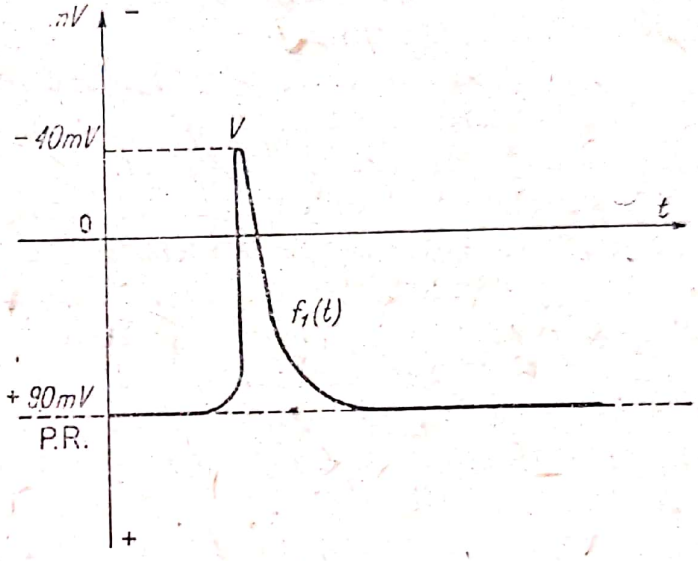


Fig. 2,6. Potențial de vîrf (spicke)
PR — potențial de repaus; V — vîrf; t — timp

$$f_1(t) = B\exp(-t/\rho), \qquad (2,18)$$

în care B este amplitudinea descărcării, iar ρ — constanta de timp a fenomenului (fig. 2,6)

Scanned with OKEN Scanner

Se poate da o expresie matematică mai complexă pentru $f_1(t)$, care să aproximeze mai bine fenomenul. Nu insistăm asupra acestuia, deoarece forma lui $f_1(t)$, fiind independentă de excitant, nu are implicaţii informaţionale.

Independenţa lui $f_1(t)$ faţă de parametrii excitantului (cu excepţia condiţiei de prag) constituie legea „tot sau nimic" a neuronului. Această lege a permis în primele timpuri ale neurociberneticii interpretarea neuronului ca un mecanism binar (ca un releu electric) cu două poziţii: vîrf sau lipsă de vîrf (1 şi 0). Impulsul electric exprimat de $f_1(t)$ apare după o întîrziere, un timp de excitaţie η, ca orice potenţial de acţiune.

Substratul energetic al vîrfului este reprezentat de o modificare bruscă (de un tip diferit de cel al membranei somatodendritice) a permeabilităţii faţă de Na^+, permeabilitatea care creşte de 400 de ori, ceea ce determină un flux de Na^+ care la axonul cefalopodelor ajunge la 4,7 μ mol/cm² pe impuls. După cum se vede, potenţialul de acţiune gradat sau de tip „tot sau nimic" este un potenţial predominant de Na^+, în timp ce potenţialul de repaus este un potenţial predominant de K^+. Revenirea membranei la un echilibru electric se face prin ieşirea din axon a unei cantităţi electric echivalente de K^+. Echilibrul electric de repaus astfel atins în mod pasiv (prin fenomene de difuziune) nu reprezintă însă echilibrul ionic de repaus, deoarece concentraţiile de Na^+ şi K^+ între interiorul şi exteriorul neuronului sînt diferite de situaţia de repaus. Refacerea echilibrului ionic implică intrarea în acţiune (după realizarea vîrfului) la un ritm intens a pompelor ionice, fapt care condiţionează postpotenţialul negativ şi pe cel pozitiv şi un consum energetic crescut (de 30 de ori) din partea celulei (Hill). Procesul de refacere completă a echilibrului ionic durează circa 100 ms.

Mecanismul energetic este încă necunoscut. Fenomenele se petrec ca şi cînd curentul excitant ar declanşa un prim mecanism similar celui din membrana somatodendritică. Dacă remanierea structurii dinamice a axonului depăşeşte un anumit prag, primul mecanism antrenează un al doilea mecanism propriu membranei axonale, care generează

Scanned with OKEN Scanner

detonarea. Evident că fenomenul de bază este tot o remaniere la nivel molecular sau leptonic a protoplasmei neuronale, remaniere posibilă datorită unui mod de organizare al axonului diferit de restul neuronului. După Bishop, acest mod de organizare, care condiţionează atît fenomenul de generare a vîrfului, cît şi modul special de propagare pe axon, este un cîştig filogenetic relativ recent, faţă de organizarea care condiţionează potenţialul de acţiune gradat.

7. Procesul energetic al detonării nu se exteriorizează numai prin potenţialul de acţiune de tip „tot sau nimic", ci şi printr-o variaţie în timp a valorii pragului p. În condiţii de repaus, p are o valoare P_m. În timpul vîrfului, membrana axonală nu este excitabilă: este perioada refractară absolută, de durată d constantă (0,5—2 m/s). Intervalul d este o constantă neuronală. Ea variază de la neuron la neuron. În genere, durata lui, raportată la viteza de propagare a impulsului pe axon, asigură o înaintare a acestuia cu 6—12 cm.

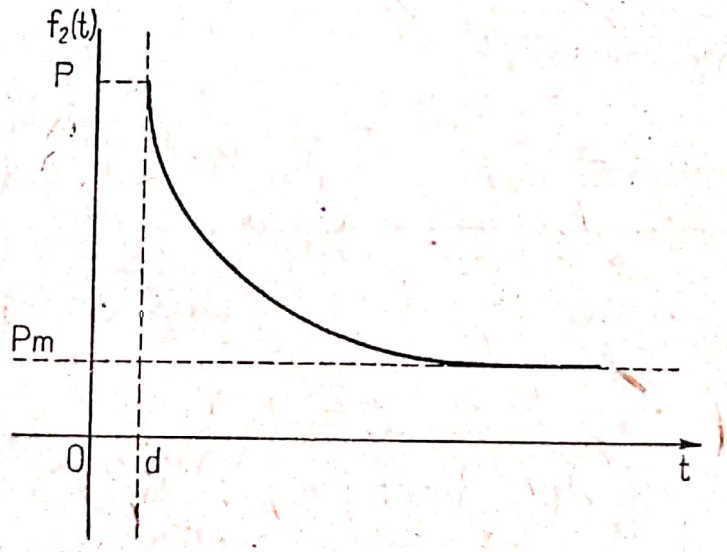


Fig. 2,7. Curba perioadei refractare; pentru legendă vezi textul

După această perioadă (d), membrana axonală redevine excitabilă, dar la un prag $P > P_m$. Valoarea lui $p = f_2(t)$ scade treptat de la $p = P$ la $p = P_m$ după o curbă (Adrian) exponenţială, astfel încît după, 0,8—4 ms scade cu 90% din valoarea P, iar după 10 — 20 ms cu 95%. Noi nu putem explica variaţia exponenţială în timp a pragului (fig. 2,7), dar o admitem ca un fapt experimental.

Scanned with OKEN Scanner

Această curbă definește perioada refractară relativă și poate fi exprimată prin relația :

$$f_2(t) = P \exp\left(-\frac{t}{\gamma}\right) + P_m \qquad (2.19)$$

cu condiția ca $t > t_0 + d$;
în care t_0 este momentul detonant, iar γ este constanta de timp proprie perioadei refractare.

Dacă aplicăm un excitant electric cu o diferență de potențial V, *condiția apariției detonării este* :

$$V \geqslant p = f_2(t) \qquad (2.20)$$

Să considerăm că se excită membrana axonală cu un curent constant (S_0).

În momentul în care s-a produs primul impuls, membrana axonală trece în stare refractară absolută. Apoi (după un interval de timp d), variația în timp a pragului este dată de relația (2,19). În momentul în care pragul redevine egal cu S_0, se produce o nouă detonare ș.a.m.d. Evident că dacă S_0 este constant, detonările se vor repeta ritmic.

Dacă se alege originea timpului, astfel încît să coincidă cu producerea unui impuls, perioada T care separă două impulsuri este dată de relația

$$T = T' + d, \qquad (2,21)$$

în care T' reprezintă intervalul de timp între sfîrșitul perioadei refractare absolute a unui impuls și apariția detonării următoare. T' este dată de ecuația :

$$S_0 = f_2(t) = P \exp\left(-\frac{T'}{\gamma}\right) + P_m. \qquad (2,22)$$

Grafic, situația se prezintă ca în figura 2,8.

După calcule simple se ajunge la următoarea formulă :

$$T = \gamma \ln \frac{P}{S_0 - P_m} + d. \qquad (2,23)$$

În expresia de mai sus, în afară de d mai intervine și un factor temporar, anume timpul de reacție a membranei axonale γ. Acesta însă nu este o constantă, neuronală, ci variază după o lege încă nedeterminată cantitativ în funcție de mărimea excitantului $\gamma = f(S_0)$.

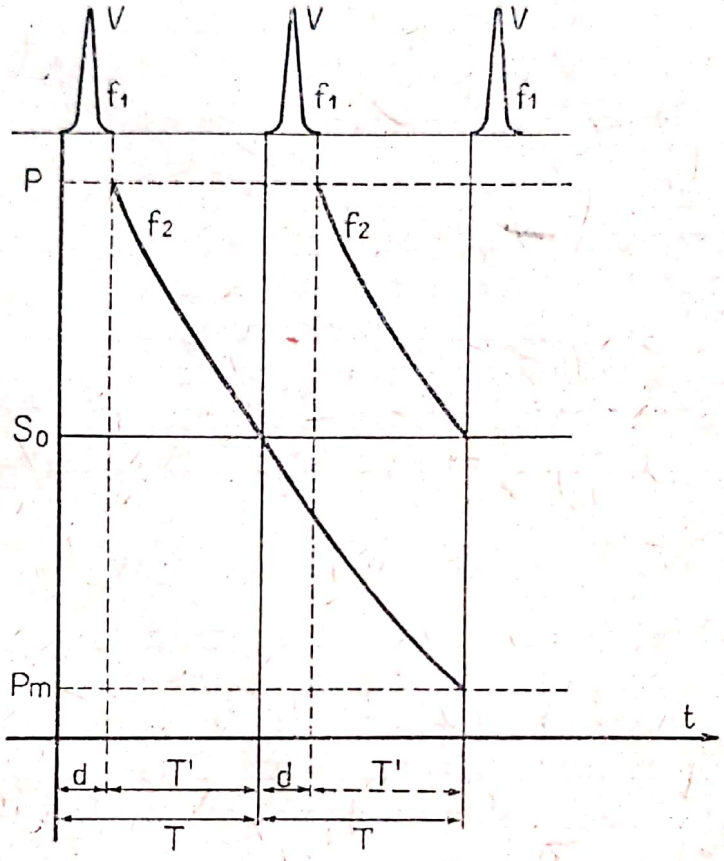


Fig. 2,8. Graficul generării de impulsuri; pentru legendă vezi textul

Avem atunci

$$T = \gamma \ln \frac{P}{S_0 - P_m} + d + f(S_0). \qquad (2,24)$$

Expresia are sens numai dacă

$$P > S_0 > P_m \qquad (2,25)$$

Din cele de mai sus se pot trage următoarele concluzii:

a. Se poate stabili o relație cantitativă între mărimea S_0 a excitației și un parametru al răspunsului axonal. Datorită legii tot sau nimic, acest parametru nu se referă

la amplitudinea răspunsului (ca în cazul membranei somato-dendritice), ci la periodicitatea impulsurilor generate. După cum reiese din (2,24), perioada T este proporţională cu logaritmul inversului mărimii excitante.

b. Cu toate că atît $f_1(t)$, cît şi $f_2(t)$ sînt independente de S_0, membrana axonală nu se comportă ca un sistem digital, ci ca un sistem analogic. Mărimea de excitaţie S_0 este codată într-un sistem de impulsuri egale modulate în frecvenţă, iar frecvenţa $(1/T)$ este aproximativ direct proporţională cu logaritmul excitaţiei S_0 ceea ce corespunde cu datele experimentale.

c. Din expresia (2.25) se vede că mărimea excitantă ce poate fi codată de axon variază între o limită inferioară sau prag (P_m) şi o limită superioară sau de saturaţie (P). Frecvenţa maximă de răspuns (pentru $S_0 \geqslant P$) depinde de lungimea perioadei refractare absolute şi de timpul de reacţie căci pentru $S_0 = P$, relaţia (2.25) dă $T = d + f(S_0)$

■

Să considerăm că se excită membrana cu un curent variabil. În acest caz, S_0 devine o funcţie de tip $S_0(t)$.

Datele experimentale arată că în acest caz frecvenţa impulsului, deci lungimea perioadei T, nu depinde numai de valoarea lui $S_0(t)$, ci şi de viteza variaţiei lui $S_0(t)$, cu alte cuvinte de derivata $\frac{dS_0}{dt}$. „Axonologia" modernă a stabilit (Skoglund) că frecvenţa impulsurilor depinde la majoritatea neuronilor, de intensitatea excitaţiei, de viteza ei de creştere (rampa) şi de viteza ei de descreştere (panta). Există tipuri de neuroni (neuronii ON — OFF) care descarcă numai în perioada de stabilire (creştere) şi în cea de anulare (descreştere) a excitaţiei (Hartline).

În fine, există neuroni (ON sau OFF) care nu descarcă decît fie la stabilirea excitaţiei, fie la anularea ei. Aceasta înseamnă că sînt sensibili la semnul derivatei $\frac{dS_0}{dt}$. Modul cum se face energetic traducerea derivatei excitaţiei şi a semnului ei este necunoscut. Trebuie să fie o proprietate

generală a structurii tututor neuronilor, dar cu variații mari de la un tip de neuron la altul.

Luînd în considerare cele de mai sus, trebuie să înlocuim în formula (25) pe S_0 cu S'_0

$$S'_0 = \alpha S_0(t) + \beta \frac{dS_0}{dt} + \partial \operatorname{sgn} \left[\frac{dS_0}{dt}\right] \qquad (2,26)$$

în care α, β și ∂ sînt constante variabile de la un tip de neuron la altul (ceea ce determină diferitele tipuri de răspunsuri axonale amintite), iar $\operatorname{sgn} x = \left[\frac{x}{x}\right]$ simbolizează intervenția semnului derivatei.

În condiții fiziologice, excitantul normal al membranei axonului este reprezentat de curentul de acțiune al membranei somatodendritice. Locul de articulare funcțională a celor două membrane este originea axonului. De aceea, în condiții normale, perioada T a descărcărilor axonale depinde de relația (2,24) cu corecția (2,26), în care $S_0(t)$ are valoarea $S_0(\bar{r},t)$, dată de relația (2,14), cu mențiunea că vectorul de poziție $\bar{r}$ se referă la regiunea (conul) de origine a axonului. Unii autori susțin că vectorul $\bar{r}$ se referă la primul internod axonal.

II. *3. Conducerea.* 1. Procesul de excitație nu rămîne în punctul unde a fost realizat. El se propagă în lungul membranei neuronale, din aproape în aproape (Hermann) (vezi fig. 2,9)

Apariția unei modificări electrice într-un punct $x = 0$ al membranei influențează în mod pasiv starea electrică a întregii membrane. Această influență se face prin proprietățile electrice ale neuronului. Proprietățile care trebuie luate în considerare sînt, după Rashewsky raza interioară r a fibrei considerate (axon, dendrită, ramificație etc.), grosimea δ a membranei ($\delta \ll r$), rezistența membranei ρ', rezistența interioară a neuronului ρ, [$\rho' \gg \rho$] și raportul γ dintre rezistența interioară a neuronului și aceea a mediului perineuronal (pe unitatea de lungime).

Scanned with OKEN Scanner

Starea electrică a unui punct al membranei este definită prin potențialul interior V, cel exterior V' sau prin intensitatea i a curentului transmembranar.

În cazul în care într-un punct $x = 0$ apare o modificare electrică (să zicem un curent de acțiune de intensi-

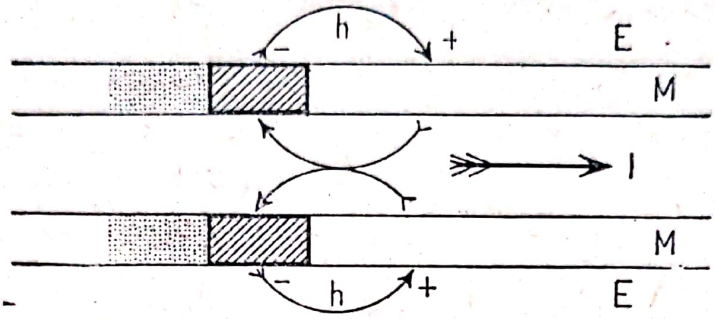


Fig. 2,9. Curenții lui Hermann

→ direcția de propagare; **M** – membrana axonală; **I** – mediul interior al axonului; **E** – mediul exterior al axonului; ▨ – zonă excitată; ▩ – zonă care a fost excitată (refractară); **h** – curenții lui Hermann

tate I), se realizează în lungul membranei o *distribuție de intensități* $i(x)$ (electrotonus) în așa fel încît, conform demonstrației lui Rashewsky, în orice punct situat la distanța x de origine (punctul $x = 0$) avem

$$i(x) = I\exp(-ax) \tag{2,27}$$

în care

$$a = \sqrt{\frac{\gamma + 1}{\gamma} \cdot \frac{2\rho}{\delta\rho' r}}.$$

Această distribuție se realizează aproape instantaneu, în momentul $t = t_1$, în care a apărut evenimentul electric considerat. În realitate, distribuția (2,27) nu se realizează chiar instantaneu, ci cu o mică întîrziere, deoarece neuronul are o capacitate mică, care determină viteza de realizare a distribuției respective.

2. Dacă intensitatea i a curentului astfel distribuit depășește sau egalează pragul h al neuronului (neobaza) în punctul x_i, el se comportă ca un excitant electric pentru

regiunea x_i a membranei. În acest caz, la momentul $t = t + \eta$ (în care η reprezintă timpul de latență), apare un curent de acțiune I în punctul x_i, situat în imediata vecinătate a punctului x_0. Acesta generează o nouă distribuție i_x ș.a.m.d. Curentul de acțiune se propagă în felul acesta din aproape în aproape, cu o viteză $v(t)$ care urmează să fie determinată și care depinde de h și de a. Rezultă relația :

$$v(t) = \frac{(I - h)\, K\, (8\rho' \partial r)^{\frac{1}{2}}}{K[2(\gamma + 1)\rho]^{\frac{1}{2}}},$$

în care K este o constantă de proporționalitate. Important este faptul că $v(t)$ este cu atît mai mare cu cît r este mai mare.

Trebuie remarcat, că $v(t)$ în lungul axonilor este o constantă, în timp ce $v(t)$ pentru membrana somatodendritică scade în timp, ceea ce caracterizează propagarea denumită cu *decrement*.

În cazuri speciale (în lungul dendritelor mai lungi), din loc în loc se găsesc regiuni privilegiate ale membranei care, cînd sînt invadate de un potențial de acțiune, generează o diferență de potențial mare cu o viteză de propagare crescută. Aceste regiuni se opun anulării transmiterii informației cînd propagarea cu decrement trebuie să se facă pe distanțe mai lungi.

3. Axonii amielinici conduc impulsurile cu o viteză de circa 1—2 m/s. Această viteză este insuficientă pentru necesitățile informaționale ale organismelor mari. O creștere a vitezei implică însă o creștere a diametrului axonului la dimensiuni incompatibile cu energetica neuronală. În cursul filogenezei, a apărut însă un tip de axon care conduce impulsurile după un alt principiu, cu viteze comparativ foarte mari, fără ca diametrul său să se modifice.

Fibrele amielinice au o teacă subțire lipidică (teaca metatropică), studiată de Bear și colab., și care pare a nu juca vreun rol în fenomenul de excitație și conducere (Fessard).

Fibrele mielinice sînt axoni perfecționați în ceea ce privește conducerea. Axonul este înconjurat de o teacă

mai groasă, formată din suprapunerea alternativă de straturi lipidice şi protidice, realizînd un sistem izolant cu o rezistenţă de $5 - 9 \cdot 10^8$ ohmi/cm²/cm (de aproximativ 10 000 000 de ori mai mare decît rezistenţa conţinutului axonal) şi cu o capacitate de 1 μ μF/mm. Teaca, după cum se ştie, este întreruptă sistematic de gîtuiturile sau nodurile lui Ranvier. În felul acesta, avem un şirag de manşoane egale, numite internoduri, cu o lungime de ordinul a 2 mm ($0{,}146 \times 10^3 \times$ diametrul axonului), separate prin internoduri cu o lungime de 0,5 microni (cu o suprafaţă de 40 μ^2), bine studiate de Hess şi Lansing şi de Rosza, Morgan, Szent Giorgy şi Wickoff.

Încă din 1923, Lilie R.S. a emis ipoteza că în axonii mielinici excitaţia se transmite saltatoriu de la nod la nod. Această idee a fost reluată de Gérard (1931), iar Rashewsky i-a dat o tratare matematică. Demonstraţia experimentală a fost făcută de Kato şi mai ales de Tasaki şi confirmată de Stämpfli. Transmiterea saltatorie asigură o viteză de propagare foarte mare (pînă la 100 m/s) şi cu economie de energie.

Principial, apariţia unui potenţial de acţiune la un nod influenţează aproximativ instantaneu starea electrică a restului nodurilor. Se realizează o distribuţie pasivă de intensităţi la diferitele noduri. Dacă modificarea electrică astfel produsă de potenţialul de acţiune al unui nod depăşeşte la nivelul nodului vecin reobaza (pragul) acestuia, nodul vecin generează la rîndul lui un potenţial de acţiune ş.a.m.d. (fig. 2,10).

a. Distribuţia instantanee a intensităţilor face apel la proprietăţile electrice ale axonului: rezistenţa interioară ρ; rezistenţa totală (la un curent radiar) ω; raportul γ între rezistenţa interioară şi exterioară a axonului şi lungimea l a internodului (care este o constantă). Dacă la un nod $n = 0$ se află un curent de acţiune de intensitate I, atunci la internodul al n-lea se găseşte un curent transmembranar de intensitate $I_{(n)}$, dat de distribuţia exprimată prin relaţia

$$I_{(n)} = I\beta^{n-1} \qquad (2{,}28)$$

în care

$$\beta = 1 + \frac{p \cdot l(\gamma + 1)}{2\pi r^2 \omega \cdot \gamma} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{\rho \cdot l(\gamma + 1)}{2\pi r^2 \omega \cdot \gamma} - 1\right)}$$

Amintim că nu este vorba de propagarea excitației, ci de distribuția de intensități de curent transmembranar

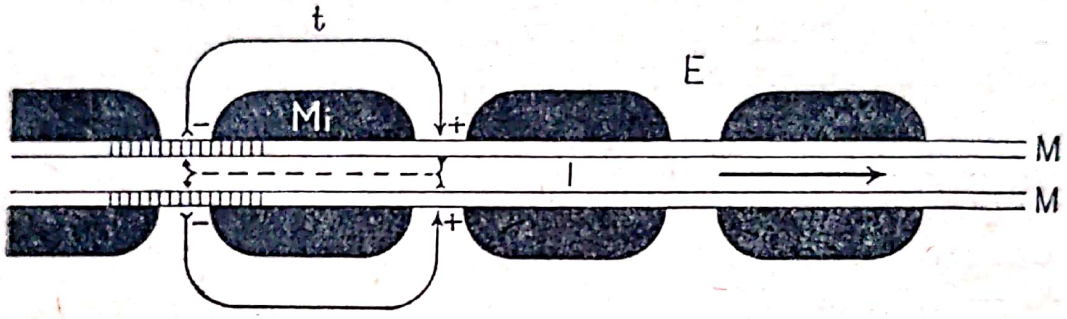


Fig. 2,10. Propagarea saltatorie

⟶ – direcția de propagare; M_1 – teaca de mielină; M – membrana axonală; I – mediul intern al axonului; E – mediul exterior al axonului; t – curenții saltatori ai lui Tasaki; ▭ – internod excitat

(de electronus), realizată în axon în momentul cînd excitația se află la nodul $n = 0$.

Se poate demonstra că (2,28) se transformă în (2,27) dacă 1 tinde către 0.

b. Excitația trece de la un nod $g - 1$ la un nod g, cînd $i_{(g-1)}$ realizează o distribuție, conform relației (2,28), astfel ca $I_{(g)}$ să egaleze sau să depășească pragul h caracteristic axonului respectiv. În acest caz este vorba de propagarea excitației care se face cu o viteză $v(t)$.

Dacă notăm cu $t = t_0$ momentul în care se ivește un potențial de acțiune la un nod oarecare $n = 0$ și cu t_1, t_2, . . . , t_m momentul în care excitația ajunge la nodul 1, 2, . . . , m, atunci viteza de propagare este dată de relația

$$v(t) = \frac{1}{t_m - t_{m-1}} \qquad (2,29)$$

Rezultă că viteza de propagare este o constantă neuronală care depinde direct proporțional, printre altele, de lungimea internodului.

Scanned with OKEN Scanner

Din cele de mai sus se vede că datorită proprietăţii de conducere a membranei somatodendritice, potenţialele de acţiune gradate sînt transmise cu decrement pînă la originea axonului.

De asemenea, datorită proprietăţii de conducere, a membranei axonale, potenţialele tot sau nimic, generate la originea axonului, sînt transmise cu o intensitate şi o viteză de propagare constante pînă la extremităţile axonale.

Aplicarea unui curent excitant într-un punct oarecare al unei fibre nervoase (axon sau dendrită) determină o excitaţie ce se propagă de la focarul respectiv în ambele sensuri. De întors înapoi însă nu se mai poate întoarce, din cauza perioadei refractare absolute, care am văzut că durează îndeajuns ca să permită îndepărtarea excitaţiei cu 6 — 12 cm.

În condiţii fiziologice, axonul este excitat numai la originea sa. De aceea, conducerea impulsurilor se face de la origine la terminaţii. Este ceea ce se numeşte conducerea *ortodromică*.

În mod artificial, axonul poate fi excitat pe parcursul lui sau chiar la terminaţii. În acest caz, impulsurile se propagă în sens invers: este conducerea *antidromică*, care diferă de cea ortodromică numai prin sensul propagării.

De la originea axonului, impulsurile invadează antidromic membrana somatică şi chiar dendritele. Această invazie arată că funcţia integratoare a neuronului se află şi sub influenţa funcţiei lui de generare de impulsuri.

La nivelul membranei somatice, propagarea se face radiar (în toate sensurile). Nu se ştie dacă există anumite direcţii privilegiate.

La nivelul dendritelor propagarea se face în ambele sensuri: spre corpul neuronal (ortodromic) sau în sens invers (antidromic). După Jung, viteza de conducere ar fi mai mare în sens antidromic. Aceasta însă ar implica o organizare electrofuncţională asimetrică a dendritelor greu de explicat.

II.4. *Decodarea finală.* La extremitatea ramificaţiilor axonului se află porţiunea terminală a membranei neuronale. Din punct de vedere informaţional, aci se produce

operația de decodare. Experimental s-a stabilit că această membrană are unele proprietăți care o deosebesc de membrana axonală.

a. Cînd este excitată electric dă răspunsuri locale electronice cu amplitudinea variabilă și cu un postefect caracterizat printr-o constantă de timp lungă în comparație cu perioada T a impulsurilor axonale.

b. Nu prezintă perioadă refractară.

c. Membrana poate să însumeze în timp răspunsurile generate de o succesiune de impulsuri axonale. Trenurile de impulsuri sînt astfel transformate (decodate) în potențiale de acțiune terminale a căror amplitudine este proporțională cu frecvența impulsurilor venite pe axon.

Datele experimentale sînt încă insuficiente pentru a înțelege modul cum se realizează această operație.

Considerații teoretice asupra cărora vom reveni la studiul rețelelor neuronale și unele date de fiziologie (Liley) sugerează că la nivelul terminațiilor axonale se produce o antilogaritmare. Nu știm dacă această operație are loc în momentul traducerii frecvenței impulsurilor axonale în amplitudinea potențialului de acțiune terminal sau în cursul traducerii acestuia la nivelul sinapsei în mesajul chimic de ieșire din neuron, reprezentat de fluxul de substanță activă secretată.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul III

SINAPSA

III. 1. Potrivit concepției neuronale, nu există continuitate între neuroni. Activitatea unui neuron se răsfrînge asupra altui neuron datorită unor raporturi de contiguitate. Locul de contact dintre doi neuroni prezintă o organizare morfofuncțională complexă pe care, în anul 1897, Foster și Sherrington au denumit-o *sinapsă*. Ulterior, s-a constatat că un neuron poate influența alt neuron și prin alte mecanisme în afară de sinapse (fenomene de cîmp, efapse).

Sinapsele sînt situate la extremitatea unor prelungiri — aparținînd arborizațiilor terminale ale unui axon sau ale unei ramuri colaterale ale unui axon. La locul de contact cu neuronul, cu care sînt conectate funcțional, aceste prelungiri prezintă o îngroșare care poate avea forma unui picioruș, unui inel, unui buton, unui bulb sau a unei varicozități. Numele generic dat acestor structuri este de butoane sau picioare terminale. Diametrul unui astfel de buton este de 0,5 — 2 μ, realizînd o suprafață de contact de circa 2 — 4 μ^2 (Haggar și Barr).

Datorită faptului că zona receptorie a unui neuron este reprezentată de membrana somantodendritică, butoanele terminale sînt dispuse numai la nivelul acesteia. În acest sens, se disting conexiuni (sau articulații) axodendritice (sinapsele sînt situate pe dendrite) și axosomatice (butoanele terminale sînt dispuse pe corpul neuronal).

Microscopia electronică a permis precizarea structurii unei sinapse (v. fig. 3,1).

O sinapsă cuprinde o membrană presinaptică (în continuare cu membrana axonală a neuronului presinaptic), care conține vezicule caracteristice cu un diametru de

Scanned with OKEN Scanner

300 — 400 Å (veziculele „aposinaptice" ale lui de Robertis și Bennet).

Față în față cu ea, însă în continuare cu membrana somatodendritică a neuronului postsinaptic, se află membrana postsinaptică sau subsinaptică, care nu prezintă nici o particularitate morfologică.

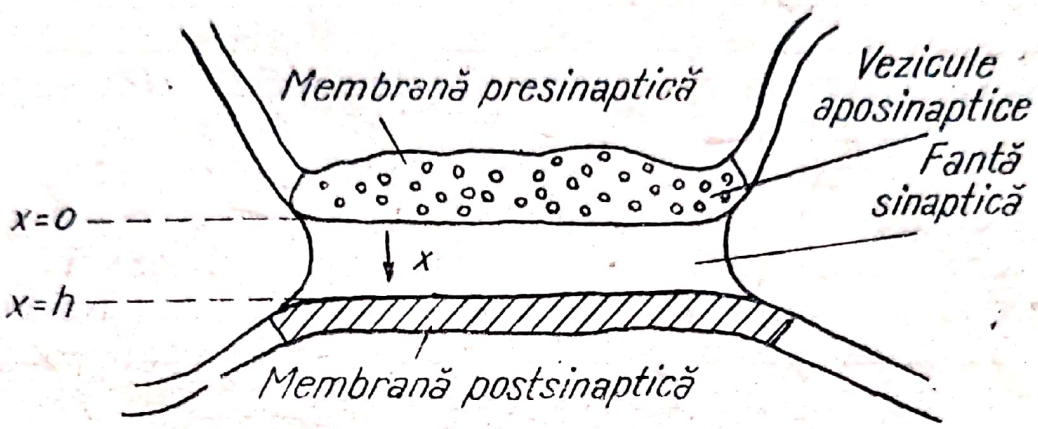


Fig 3,1. Schema structurii unei sinapse

Între ele se află fanta sinaptică, cu o lărgime constantă pentru aceeași sinapsă, variind însă de la un tip de sinapsă la altul de la 150 Å la 500 Å. Cele două membrane — pre și postsinaptică — sînt deci paralele (indiferent de neregularități și contururi). Spațiul care definește fanta este închis lateral prin formații nevroglice și este umplut cu un mediu omogen fin granulat.

III. 2. La nivelul membranei presinaptice există un potențial de repaus cu aceeași valoare și la baza căruia stau aceleași mecanisme ionice, ca la nivelul oricărei porțiuni a membranei neuronale.

Am văzut că membrana terminală generează potențiale de acțiune a căror amplitudine depinde de frecvența impulsurilor (de tip tot sau nimic) axonale. Aceste potențiale de acțiune se propagă la nivelul membranei presinaptice și definesc potențialul presinaptic.

La nivelul membranei postsinaptice se poate înregistra de asemenea un potențial de repaus, care este în fond potențialul de repaus al membranei neuronale.

Sub influența potențialului presinaptic se modifică starea de repaus a membranei postsinaptice, iar această modificare influențează energetica întregului neuron postsinaptic.

În unele sinapse, membrana postsinaptică generează (sub influența potențialului presinaptic) un curent de acțiune de tipul celui al membranei somatodendritice. Este potențialul de acțiune postsinaptic care apare la sinapsele excitatorii.

În alte sinapse (tot sub influența potențialului presinaptic) apare în membrana postsinaptică o hiperpolarizare electrică. Această hiperpolarizare definește un fenomen de inhibiție, iar sinapsele de acest tip se numesc sinapse inhibitorii.

Rolul fundamental al sinapsei este să condiționeze apariția și mărimea modificărilor electrice în membrana postsinaptică. Acest potențial postsinaptic apare deci ca o funcțiune a potențialului presinaptic.

Totdeauna evenimentele electrice din membrana postsinaptică apar cu un decalaj în timp — numit întîrziere sinaptică (0,3 — 0,5 ms) — față de potențialul presinaptic care le-a generat.

III. *3.* Multă vreme s-a crezut că transmiterea informației (excitației sau inhibiției) prin sinapsă este un fenomen electric. Faptul că potențialul presinaptic este mai mic decît cel postsinaptic, existența întîrzierii sinaptice, acțiunea unor anumiți agenți farmacologici au impus însă o concepție humorală. Potrivit acesteia, membrana presinaptică secretă o substanță chimică — denumită intermediar chimic — al cărei flux este o funcție a mărimii potențialului presinaptic. Această substanță activă străbate fanta sinaptică și apoi exercită o acțiune asupra structurii membranei postsinaptice. Aceasta își modifică permeabilitatea față de ionii de sodiu, generînd un potențial postsinaptic a cărei amplitudine este o funcție a fluxului de intermediar care a ajuns la membrana postsinaptică (Eccles).

III. *4.* Rolul secretor al celulelor nervoase ale sistemului vegetativ a fost semnalat de Dale (1914) și studiat de Dale și Feldberg.

Scanned with OKEN Scanner

La noi în țară, D. Danielopolu a consacrat acestei, probleme o mare parte din activitatea sa științifică.

Cercetările lui Nachmansohn au arătat că secreția de intermediari este o proprietate generală a tuturor neuronilor, atît în sistemul nervos central, cît și în cel periferic.

Fiziologia și biochimia modernă au confirmat și clarificat funcțiunea secretorie a celulei nervoase.

Pe plan morfologic, s-a stabilit o corelație între activitatea secretorie a neuronilor și veziculele aposinaptice din membrana presinaptică. Intermediarul chimic ar fi sintetizat în citoplasmă prin activitatea enzimatică a acesteia și depus (stocat) în veziculele amintite (De Robertis și Bennet). Enzimele necesare sînt fixate pe mitochondrii. Aceasta ar explica și aglomerarea mitochondriilor în membrana presinaptică.

Astăzi se știe că majoritatea celulelor nervoase secretă acetilcholina (ACH). Toate datele cu privire la modul de funcționare a sinapselor excitatorii au fost stabilite pe sinapse acetilcholinice. În cele ce urmează ne vom referi la acest tip de sinapse.

S-au mai descris și alți intermediari chimici (C. Hebb) în cadrul sinapselor de tip excitator, dar studiul lor este de-abia început. Sînt două grupe de substanțe: a) esterii cholinici (butiril-cholina, propionil-cholina, indol-acetil-cholina) și b) esterii betainici (γ-butiro-betaina). S-ar putea ca și serotonina (5-hidroxitriptamina) să joace un rol similar.

Acetilcholina este sintetizată în citoplasma întregului neuron. Ea este legată — instabil — de un suport macromolecular, la nivelul veziculelor aposinaptice (sau microsomiale).

Aceste vezicule sînt apoi eliminate (printr-un mecanism necunoscut) prin membrana presinaptică.

În neuron există un flux de formare a ACH, care duce la acumularea ei în nerv pînă la circa 5 μg/g de nerv. Totodată, în stadiul de repaus, un număr oarecare de vezicule (deci de grupuri sau pachete de molecule de ACH), prin jocul agitației termice, este eliminat prin membrana presinaptică. Această eliminare reprezintă secreția de repaus a sinapsei și debitul ei definește dinamica membranei presinaptice în repaus.

Scanned with OKEN Scanner

III. 5. Depolarizarea membranei presinaptice — ivirea, cu alte cuvinte, la nivelul ei a unui potențial de acțiune — modifică secreția de ACH printr-un mecanism încă necunoscut.

Ritmul sintezei nu se modifică, ci numai eliminarea de ACH, în fanta sinaptică, crește. Cantitatea aceasta crescută de ACH secretată în fanta sinaptică depinde de starea de excitație a membranei presinaptice. Deoarece potențialul presinaptic este un potențial gradat și cantitatea de ACH secretată va fi variabilă. Liley A. W. a arătat că debitul de acetilcholină secretată variază exponențial în raport cu potențialul de acțiune al membranei presinaptice. Putem așadar să scriem:

$$D(t) = M \exp[U(t) - U_0 + 1] + N \qquad (3,1)$$

în care $D(t)$ este debitul de intermediar (ACH) secretat;
$U(t)$ — funcția care descrie potențialul de acțiune al membranei presinaptice;
U_0 — potențialul de repaus al membranei presinaptice;
N — debitul de repaus (care are rolul de zgomot);
M — o constantă de proporționalitate.

Se vede că debitul crește exponențial în raport cu $U(t)$. De asemenea, se vede că în repaus (cînd $U(t) = U_0$), $D(t)$ are valoarea lui N.

S-a putut demonstra (De Robertis și Katz) că ACH este secretată în grupuri sau pachete de molecule.

În fanta sinaptică, pachetele se desfac astfel încît nu intervine decît debitul molecular.

III. 6. În fanta sinaptică, intermediarul (ACH) este transmis de la membrana presinaptică la cea postsinaptică.

Conform datelor de microscopie electronică, întreaga fantă sinaptică poate fi considerată ca un cilindru cu două baze paralele (membrana presinaptică și cea postsinaptică) și cu o înălțime h (cf. fig. 3,2). Intermediarul chimic este secretat prin una din baze, conform relației (3,1). Substanța se transmite de la această bază pe direcția x, perpendi-

culară pe cele două baze. Deoarece mediul din interior este omogen, în acest cilindru avem de-a face cu un fenomen plan, adică cu un fenomen la care, în toate punctele unei secţiuni sau membrane transversale perpendiculare pe axa x (deci paralelă cu bazele), întîlnim aceeaşi stare a mediului.

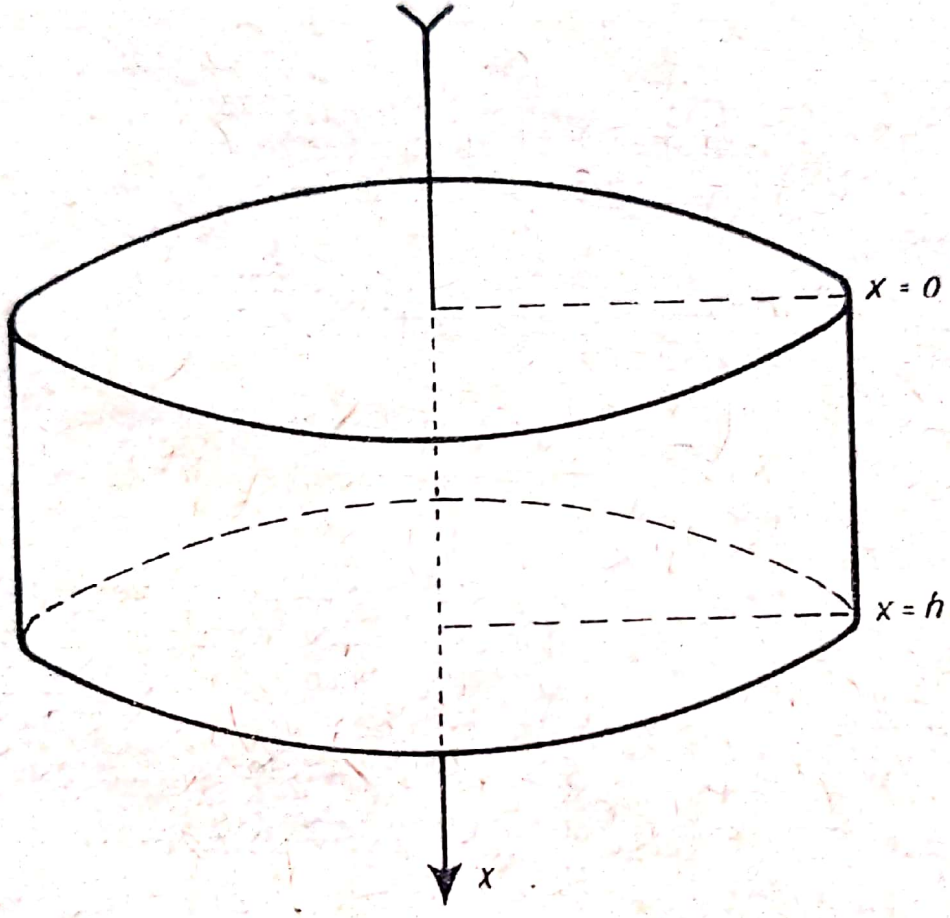


Fig. 3,2. Schema sinapsei

Transmiterea intermediarului prin fanta sinaptică este rezultanta a două procese. În primul rînd este vorba de difuziunea substanţei active care se face conform legilor fizice ale difuziunii. În al doilea rînd, trebuie să admitem că intermediarul este supus unei distrugeri exercitate de o contrasubstanţă, căci altfel intermediarul s-ar acumula în fantă. Datele experimentale au arătat existenţa acestor constrasubstanţe. În cazul sinapselor cu ACH este vorba de cholinesteraza specifică, un ferment care hidrolizează ACH şi îi anulează acţiunea asupra membranei post-

Scanned with OKEN Scanner

sinaptice. În cazul sinapselor cu alți esteri cholinici ar interveni o pseudocholinesterază. Condițiile necesare pe care trebuie să le îndeplinească contrasubstanțele sînt: să fie în cantitate suficientă și să acționeze suficient de rapid, ceea ce s-a verificat experimental. Astfel, cantitatea de cholinesterază este de cinci ori mai mare decît minimul necesar. De asemenea, viteza de reacție este extrem de mare: o moleculă de cholinesterază hidrolizează o moleculă de ACH în 30 μs (Nachmansohn). Deoarece timpul minim de schimbare de impedanță în axon este de 100 μs, se vede că viteza de reacție este suficientă ca să asigure eficiența sinapsei.

Ținînd seama de fenomenele menționate, se ajunge la concluzia că în sinapsă concentrația a de intermediar chimic satisface ecuația

$$\frac{\partial a}{\partial x^2} = \frac{\partial a}{\partial t} + \beta a. \qquad (3,2)$$

Ne interesează variația concentrației provocată de o variație de potențial presinaptic numai în domeniul sinapsei, deci ecuația (3,2) se integrează pentru domeniul de la $x = 0$ la $x = h$.

La nivelul $x = 0$, care corespunde membranei presinaptice $\frac{\partial a}{\partial x}$, este o funcție cunoscută ($q(t)$), care definește debitul de intermediar secretat de membrana presinaptică. Relația (3,1) stabilește valoarea acestui debit în funcție de valoarea potențialului presinaptic. În felul acesta se stabilește o relație cantitativă între potențialul presinaptic, debitul de substanță activă secretată și concetrația a de substanță în imediata vecinătate a membranei presinaptice.

La nivelul $x = h$, orice transport de intermediar încetează, deoarece substanța acestuia nu iese din spațiul ce reprezintă fanta sinaptică. Deci pentru $x = h$, $\frac{\partial a}{\partial x} = 0$.

În mod aproximativ, pentru $t \leqq 0$, $a = 0$ în orice punct al sinapsei.

Ţinînd seama de condiţiile enunţate, ecuaţia cu derivate parţiale (3,2) propusă de noi a fost intregrată de R. Bădescu.

III. 7. Moleculele de substanţă activă, care ajung la membrana postsinaptică, acţionează asupra acesteia. În

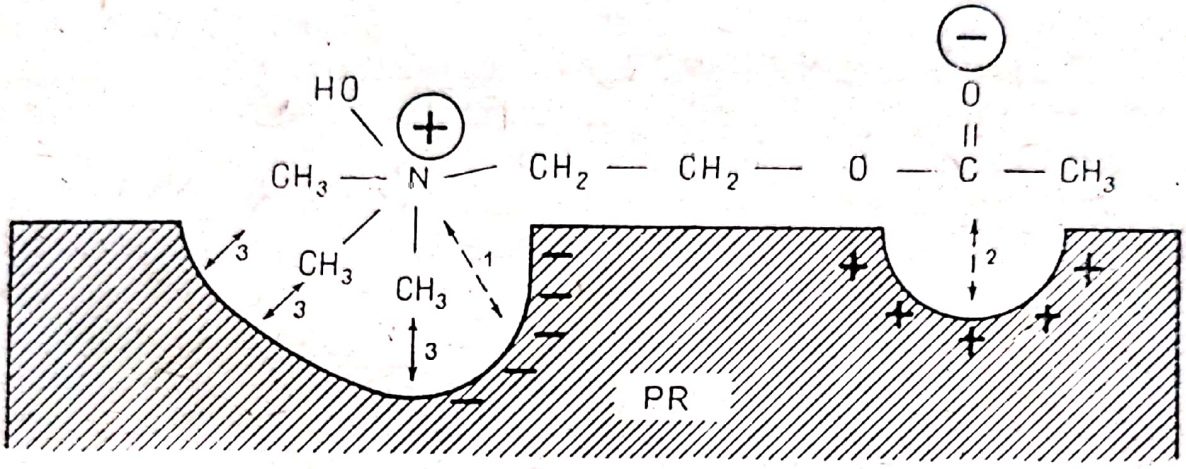


Fig. 3,3. Fixarea moleculei de acetilcholină pe proteina receptoare (în parte după Nachmansohn)

PR – proteina receptoare; ⊕ – extremitatea pozitivă a moleculei de acetilcholină; ⊖ – extremitatea negativă a moleculei de acetilcholină; 1 – legătură ionică univalentă; 2 – legătură covalentă; 3 – forţe v. d. Walls

cazul ACH se ştie că ea se depune la suprafaţa membranei postsinaptice. Această proteină receptoare a fost izolată (Ehrenpreiss). Pare să fie un aminopolizaharid (Chagas). Polul pozitiv al ACH se fixează pe regiunea negativă a moleculei proteice prin forţele coulombiene ale unei legături ionice uni-univalente (Wilson şi Bergman), care impune o apropiere pînă la 5,4 Å a moleculei de ACH şi de proteină. Regiunile negative ale proteinei receptoare constituie locurile principale de fixare şi orientare ale ACH pe membrana postsinaptică. Aceste locuri se găsesc la distanţe de aproximativ 14 Å unele de altele (Chagas). În afară de această legătură ionică, mai intervin şi alte forţe care determină nu numai fixarea ACH pe proteina receptoare, dar şi o deformare a acestei proteine receptoare, ceea ce modifică echilibrul membranei postsinaptice şi

Scanned with OKEN Scanner

are drept consecinţă o schimbare a permeabilităţii ei pentru ioni de Na^+. S-a putut stabili că fixarea unei molecule de ACH pe membrana postsinaptică determnă o pătrundere de 500 — 1 000 ioni de Na^+, fapt care se manifestă printr-o modificare a potenţialului transmembranar.

Ca orice porţiune a membranei neuronale, membrana postsinaptică (sau subsinaptică) are un potenţial de repaus întreţinut de mecanisme complexe, care folosesc dinamica ionilor monovalenţi (Na^+, K^+ şi Cl^-). ACH şi, în general, substanţele active din sinapsă modifică structura dinamică a membranei postsinaptice şi, ca atare, apare un potenţial de acţiune numit potenţial postsinaptic. Acesta diferă de potenţialul de acţiune somatodendritic studiat în capitolul precedent numai prin faptul că este generat de un agent chimic în loc de unul electric. S-a putut demonstra (Bishop) că membrana postsinaptică este inexcitabilă electric şi că deci singura modalitate de a o face să genereze un potenţial de acţiune este folosirea unui agent chimic.

Problema cantitativă care se impune este să se stabilească valoarea potenţialului postsinaptic în funcţie de cantitatea de molecule de intermediar care sosesc la membrana postsinaptică.

a. Ecuaţia rezultată din integrarea ecuaţiei (3,2) ne dă valoarea concentraţiei a în vecinătatea membranei postsinaptice (deci pentru $x = h$). Considerînd un volum determinat de suprafaţa membranei postsinaptice (A) şi de o înălţime egală aproximativ cu o moleculă de substanţă activă, putem calcula cunoscînd concentraţia a, numărul z de molecule care pot acţiona asupra membranei postsinaptice.

Membrana aceasta are o structură care îi permite să fixeze un număr M maxim de molecule. Caracterul acesta finit şi limita respectivă depind de numărul de locuri de fixare şi de dimensiunile moleculelor de intermediar.

S-a arătat că, în cazul ACH, locurile sînt separate în membrană prin distanţe de circa 14 Å. De asemenea, nu trebuie uitat că molecula de ACH acoperă o suprafaţă de circa 30—50 Å.

De asemenea, ştim că legătura dintre moleculele de ACH şi proteina receptoare nu este stabilă. Labilitatea

aceasta depinde de o constantă de echilibru, care se poate determina experimental.

În aceste condiţii, numărul n de molecule care se fixează pe membrana postsinaptică este dat de relaţia

$$n = kz(M - n), \tag{3,3}$$

care ne arată că acest număr depinde de numărul de molecule din vecinătatea membranei, de numărul maxim de locuri de fixare din membrana postsinaptică şi de constanta k de echilibru (care asigură în fond durata fixării moleculei active pe proteina receptoare).

În toate sinapsele constanta k are o valoare care asigură transmiterea informaţiei (excitaţiei sau inhibiţiei). Numai în celulele lui Renshaw, din cornul anterior al măduvei, constanta k asigură o persistenţă îndelungată a ACH pe membrană (Eccles, Fatt şi Koketsu), ceea ce determină un postefect foarte prelungit.

b. Am văzut că membrana receptoare răspunde printr-o migraţie ionică şi că fluxul de ioni astfel determinat este proporţional cu numărul moleculelor fixate. Avem aşadar:

$$n_i = k_i n, \tag{3,4}$$

în care: n_i este numărul ionilor deplasaţi;
n — numărul moleculelor fixate;
k_i — coeficientul de proporţionalitate;
i — un indice în raportul cu tipul de ion considerat (Na^+, K^+, Cl^-).

Am văzut că pentru ACH, $k_{Na^+} = 500 - 1\,000$.

Migraţiile ionice determină însă o modificare a concentraţiei lor şi, în special, a raportului concentraţiilor aceluiaşi ion din interiorul şi dinafara neuronului. Conform legilor lui Nernst, verificate experimental de Hodgkin şi colab., potenţialul transmembranar este însă o funcţie logaritmică a raporturilor dintre concentraţiile exterioare şi interioare ale ionilor monovalenţi (vezi ecuaţia lui Goldman dată în capitolul precedent).

Rezultă că va apare o modificare de potenţial $U'(t)$, ce va fi o funcţie logaritmică a numărului de ioni care au fost deplasaţi de fixarea substanţei active pe proteina

receptoare. Avem deci:

$$U'(t) - U'_0 = f(ln \sum_i n_{i,t}), \tag{3,5}$$

în care U'_0 este potențialul de repaus al membranei subsinaptice.

III. 8. Din cele expuse se vede că, datorită dinamicii biochimice a sinapsei, se trece de la potențialul presinaptic $(U(t) - U_0)$ la potențialul postsinaptic $(U'(t) - U'_0)$ prin lanțul de evenimente descrise cantitativ de ecuațiile (3,1), (3,2), (3,3), (3,4) și (3,5). În cadrul acestei interdependențe, care asigură trecerea informației de la un neuron la altul, trebuie să luăm în considerare încă două fenomene.

a. În primul rînd, în cursul propagării prin sinapsă se produce o întîrziere și o distorsiune în timp, datorită constantelor de timp ale fenomenelor biochimice succesive din sinapsă.

Dacă potențialul presinaptic se desfășoară între momentele t_1 și t_2, potențialul postsinaptic se înregistrează între momentele t'_1 și t'_2. Între aceste intervale avem următoarele două relații:

$$t'_1 = t_1 + \eta, \tag{3,6}$$

unde η reprezintă o constantă neuronală numită întîrziere sinaptică (ea are o valoare de 0,5 ms) și

$$t'_2 - t'_1, > t_2 - t_1. \tag{3,7}$$

Relația (3,7) exprimă deci existența unui postefect. Acesta se produce pentru că la încetarea excitației potențialul postsinaptic nu-și revine instantaneu, ci relativ lent, după o curbă descendentă exponențială cu o constantă de timp de 3 — 5 m/s.

Această lărgire a duratei potențialului permite o mediere în timp a mesajelor nervoase, ceea ce are o aplicare în interpretarea probabilistă a rețelelor nervoase complexe.

b. În al doilea rînd, trebuie să ținem seama că în repaus se produce totuși un flux de pachete de molecule de substanță activă. Acest flux determină și o activitate electrică

Scanned with OKEN Scanner

de repaus a membranei postsinaptice. Sînt așa-numitele *potențiale miniatură* (Fatt și Katz), fiecare potențial miniatură corespunzînd unui pachet de molecule secretate în fantă. Distribuția lor știm că este aleatorie. Aceste potențiale miniatură se comportă ca un zgomot de fond și ele condiționează pragul sinapsei.

III. 9. Față de membrana somatodendritică potențialul postsinaptic se comportă ca un excitant electric care provoacă un potențial de acțiune. În capitolul precedent am văzut care sînt relațiile cantitative între mărimea potențialului unui excitant electric și mărimea potențialului de acțiune provocat. În felul acesta, dispozitivul de telecomandă reprezentat de sinapsă se articulează cu dispozitivul de telecomandă reprezentat de neuron.

Mecanismul descris este principial valabil pentru toate sinapsele centrale. În cazul sinapselor excitatorii, substanța activă determină, prin migrația de Na^+ și, în subsidiar, de K^+ și Cl^-, un potențial de acțiune negativ la exterior, care acționează asupra membranei neuronale conform celor prezentate. Efectul electrotonic produs în membrana somatodendritică poate defini o stare de excitație supraliminară a neuronului (care să se manifeste prin apariția descărcărilor ritmice de pe axon) sau o stare de excitare subliminară, care nu se manifestă prin descărcări axonale. Două sau mai multe stări de excitație subliminară se pot suma și pot genera un nivel de excitație care, depășind pragul axonal, să fie tradus prin impulsurile modulate în frecvență ale axonului. De obicei, o sinapsă singură nu poate forța pragul axonal, ci este necesară o însumare de aproximativ zece sinapse excitate. Desfășurarea cantitativă a fenomenelor de însumare este descrisă de relațiile (2,14)—(2,17) din capitolul precedent.

Dar și o sinapsă singură poate excita neuronul în condiții speciale de sumare în timp.

Fenomenele se complică prin prezența sinapselor inhibitorii. În aceste sinapse, substanța activă pare să fie un factor chimic (izolat de Florey și colab. sub numele de factor I), în structura căruia ar intra, ca o componentă

Scanned with OKEN Scanner

activă, acidul γ – aminobutiric (GABA). Intermediarul inhibitor ar modifica permeabilitatea membranei numai pentru K^+ și Cl^- și ar determina în membrana postsinaptică un potențial de acțiune pozitiv la exterior, deci un fenomen de hiperpolarizare (Eccles și colab.). Relația cantitativă dintre potențialul presinaptic și cel postsinaptic este descrisă de aceleași ecuații ca în cazul sinapselor excitatorii. Se schimbă evident diferiții coeficienți de proporționalitate și sensul potențialului postsinaptic. De asemenea, constanta de timp a postefectului este mai mică (2,3 — 2,9 m/s).

Acest potențial pozitiv determină în membrana somatodendritică un potențial pozitiv, care se propagă ca și cel negativ și care se însumează cu celelalte fenomene electrice din membrană. Avînd semnul schimbat, este evident că efectul potențialelor de acțiune negativă diminuează sau e suprimat. Or, aceeasta este însăși definiția inhibiției.

Din cele de mai sus rezultă că starea de excitație centrală a neuronului, așa cum a definit-o Sherrington, și care se traduce prin frecvența impulsurilor axonale, este rezultanta sumării atît a semnalelor venite prin sinapsele excitatorii, cît și a semnalelor venite prin sinapsele inhibitorii.

Relațiile (3,14) și (2,17) din capitolele precedente exprimă această stare. Trebuie să avem grijă doar să specificăm că semnalele inhibitorii din relația de mai sus iau un coeficient negativ.

În felul acesta, relația (2,14) exprimă intervenția sinapselor excitatorii și inhibitorii și acțiunea de integrare a lor de către neuron, integrare care subsumează noțiunile de sumare în timp și spațiu, de excitare, facilitare și inhibiție.

De remarcat, că, datorită intervenției vectorului de poziție (a funcției $\Psi(d)$), poziția sinapsei pe neuron este esențială atît prin distanța relativă față de originea axonului, cît și prin distanțele reciproce față de celelalte sinapse.

Unii autori (Gesell) au descris în membrana somatodendritică a neuronului un gradient de potențial care ar fi una dintre condițiile funcțiunii neuronale. Capătul dendritic

ar fi mai puţin polarizat cu 10 — 20μV decît axonul. Modul de acţiune al sinapselor ar varia astfel şi în raport cu poziţia lor faţă de acest gradient. S-a susţinut chiar că o sinapsă de tip excitator, acţionînd la nivelul originii axonale, depolarizînd această origine, ar suprima gradientul amintit, ceea ce ar fi echivalent cu o suspendare a excitabilităţii neuronului şi deci ar fi un fenomen de inhibiţie.

De asemenea, unele cercetări (Purpura) au pus în evidenţă modificări ale comportamentului biochimic al sinapselor unui neuron, în funcţie de poziţia lor pe neuronul respectiv.

III. *10.* Din cele expuse, rezultă că sinapsa funcţionează ca un sistem de telecomandă chimică. Semnalul de intrare este reprezentat de potenţialul presinaptic, iar semnalul de ieşire de potenţialul postsinaptic. Din analiza matematică prezentată reiese că funcţia de transfer a întregii sinapse asigură o proporţionalitate între semnalul de intrare şi cel de ieşire. Codarea la intrare are la bază o relaţie exponenţială care stabileşte legătura cantitativă dintre mărimea semnalului electric şi mărimea semnalului chimic. Decodarea la ieşire are însă la bază o relaţie logaritmică, care restabileşte caracterul de constantă a funcţiei de transfer a sinapsei.

Informaţiile care se pot transmite într-o sinapsă au drept bază energetică cantităţile de molecule sau de pachete de molecule de substanţă activă transportată de la membrana presinaptică la cea postsinaptică. Eficienţa informaţională a sinapsei are drept limită inferioară fluxul de repaus intermediar, acel flux de care am amintit deja că se comportă ca un zgomot de fond. Există de asemenea şi o limită superioară, o valoare de saturaţie care este determinată de numărul maxim de molecule de substanţă activă care se poate fixa pe suprafaţa membranei postsinaptice.

În aceste condiţii, cantitatea C de informaţii care străbat o sinapsă poate fi evaluată cu formula Shannon:

$$C = D \lg_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right) \text{ biţi/s}, \qquad (3.8)$$

în care: D este o constantă;

S — semnalul util (deci fluxul activ de intermediar);

N — zgomotul (deci fluxul de repaus de intermediar). Doarece N reprezintă fluxul abaterii, determinat de agitaţia termică de la nivelul membranei presinaptice, el depinde de temperatura absolută a sistemului şi de constanta lui Boltzmann.

Capacitatea informaţională a sinapsei, exprimată în biţi/s este dată de formula (3,8), în care S are valoarea de saturaţie.

III. *11*. În paginile precedente am analizat modul de funcţionare a diferitelor componente neuronale şi a sinapselor. Asamblarea lor într-un tot funcţional asigură celulei nervoase rolul ei în organism. Modul cum se leagă

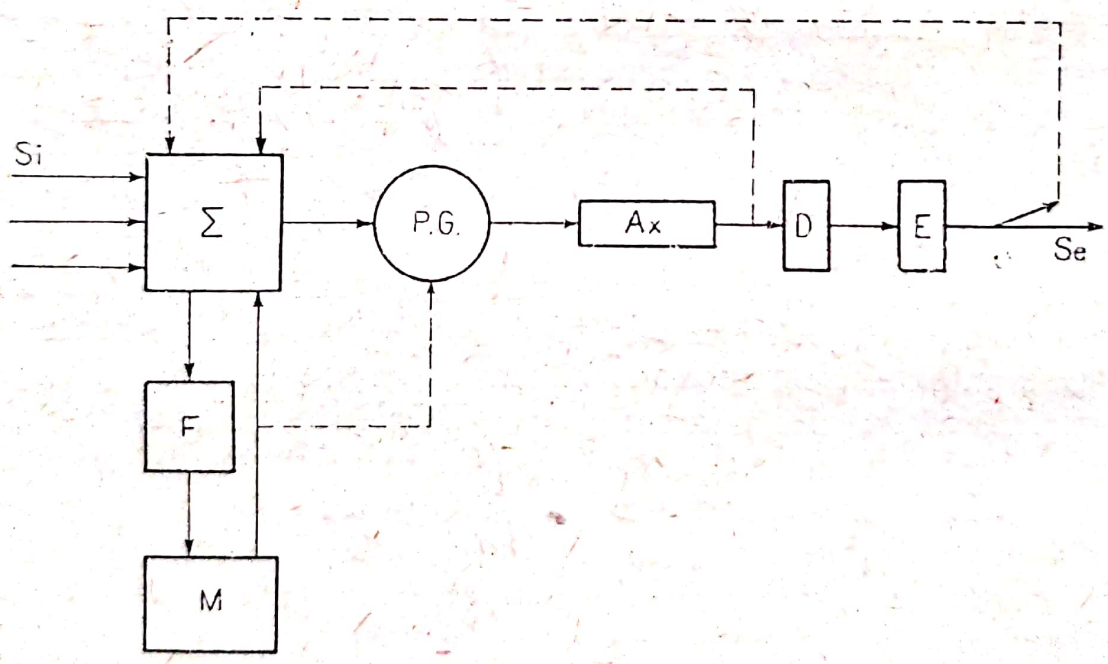


Fig. 3,4. Schema logică a neuronului (pentru legendă vezi textul)

între ele diferitele componente funcţionale ale neuronului poate fi exprimat simbolic prin următoarea schemă logică.

Excitanţii *Si* acţionează asupra membranei somato-dendritice care, în ansamblul ei, funcţionează ca un tra-

ductor și un sumator. Acest traductor-sumator funcționează conform relațiilor matematice expuse în paginile precedente.

Sumatorul Σ acționează asupra unui mecanism de generare de impulsuri G, care intră în funcțiune numai dacă se depășește un anumit prag. Deci mecanismul G presupune existența unui element prag P. Elementele G și P pot fi separate sau reunite în același bloc. Ele sînt localizate la originea axonului (conul de origine).

În paralel cu sumatorul și generatorul-prag se află un dispozitiv de memorare M — corespunzător memoriei de durată. Aci, unele dintre excitațiile primite de neuron în decursul existenței sale (triate în funcție de un factor de pondere de către un filtru F) sînt păstrate un timp îndelungat. Starea lui M influențează în orice moment atît pe Σ, cît și pe $P.G.$

Impulsurile (modulate în frecvență) generate de dispozitivul $P.G.$ sînt transmise în lungul unui canal de transmisiune Ax reprezentat de axon.

La extremitatea acestuia, impulsurile sînt decodate în D (din impulsuri modulate în frecvență se ajunge la un potențial gradat).

În fine, D este cuplat cu dispozitivul de ieșire E, unde fenomenul electric este tradus în fenomen chimic și emis ca atare în sinapsa de ieșire.

Din schemă se vede că între generatorul de impulsuri și sumator există o conexiune inversă (căci impulsurile axonale se propagă antidromic în membrana somatodendritică).

Schema, astfel stabilită, pentru neuronul tip Golgi I, este valabilă pentru orice tip de neuroni.

Aplicarea ei la neuronii tip Golgi II nu întîmpină nici o dificultate, căci doar axonul este foarte scurt.

De asemenea, pentru neuronii unipolari, aplicarea schemei de mai sus nu întîmpină dificultăți, deoarece traductorul-sumator se reduce doar la membrana somatică.

Pentru neuronii bipolari senzoriali (din retină sau din ganglionul lui Corti) situația este aceeași cu un neuron Golgi I, numai că dendritele se desprind din somă sub

Scanned with OKEN Scanner

forma unui trunchi unic. De asemenea, trebuie observat că un prim sistem de intrări este reprezentat de contactul arborizațiilor dendritice terminale cu celulele senzoriale. Există un al doilea sistem de intrări reprezentat de sinapsele situate la nivelul corpului neuronal.

În cazul neuronilor bipolari din ganglionii spinali, problema este în aparență mai dificilă. În acest caz, dispozitivul de traducere și sumare se reduce la extremitatea terminației aferente, la locul de contact cu celula senzorială. Din modul însuși de funcționare se înțelege că nici nu e nevoie de un sumator spațial. Dispozitivul de generare de impulsuri se află, ca și în cazul neuronului Golgi I, la locul de trecere de la tipul de membrană somatică la tipul de membrană axonală, deci la nivelul primului nod Ranvier. Canalul de transmisiune e reprezentat de prelungirea celulipetă și, în continuare, de cea celulifugă, ambele funcționînd ca un singur axon. Intervenția membranei somatice este încă discutabilă: s-ar putea ca ea să funcționeze ca o a doua regiune receptoare, deci ca un al doilea traductor-sumator, asupra căruia ar acționa alți neuroni, ce fac sinapse la acest nivel (în ganglionul spinal) cu neuronul bipolar considerat[1].

III. *12.* Neuronul, în ansamblul său, împreună cu sinapsele, așa cum reiese din analiza neurofiziologică modernă și așa cum este precizat de schema logică de mai sus și de modelele matematice expuse, funcționează cu un dispozitiv de telecomandă.

Izvorul de informație e reprezentat, în condiții fiziologice, de agentul chimic ce acționează asupra membranei neuronale. Variațiile cantitative ale acestui agent chimic

[1] Se vede deci că denumirea de dendrită dată prelungirii periferice a celulei ganglionare spinale nu este corectă. Termenul de dendrită nu poate fi aplicat decît acelor prelungiri a căror membrană se comportă ca un traductor-sumator și la nivelul cărora fenomenul de conducere se supune legii propagării cu decrement. În cazul neuronilor neurosecretori, schema logică este aceeași, numai că în locul generatorului de impulsuri cu prag (*P.G.*) se află ieșirea *E*. Mărimea de ieșire din neuron în acest caz este concentrația de hormon secretat. Aceasta este o funcție exponențială a stării sumatorului.

Scanned with OKEN Scanner

reprezintă semnalul de intrare. Intrarea în sistemul cibernetic neuronal e formată de acele porţiuni chimic excitabile ale membranei somatodendritice, care sînt acoperite de butoanele sinaptice (vezi cap. anterior), porţiuni denumite *membrane postsinaptice*. Ele se comportă ca niște traduc-

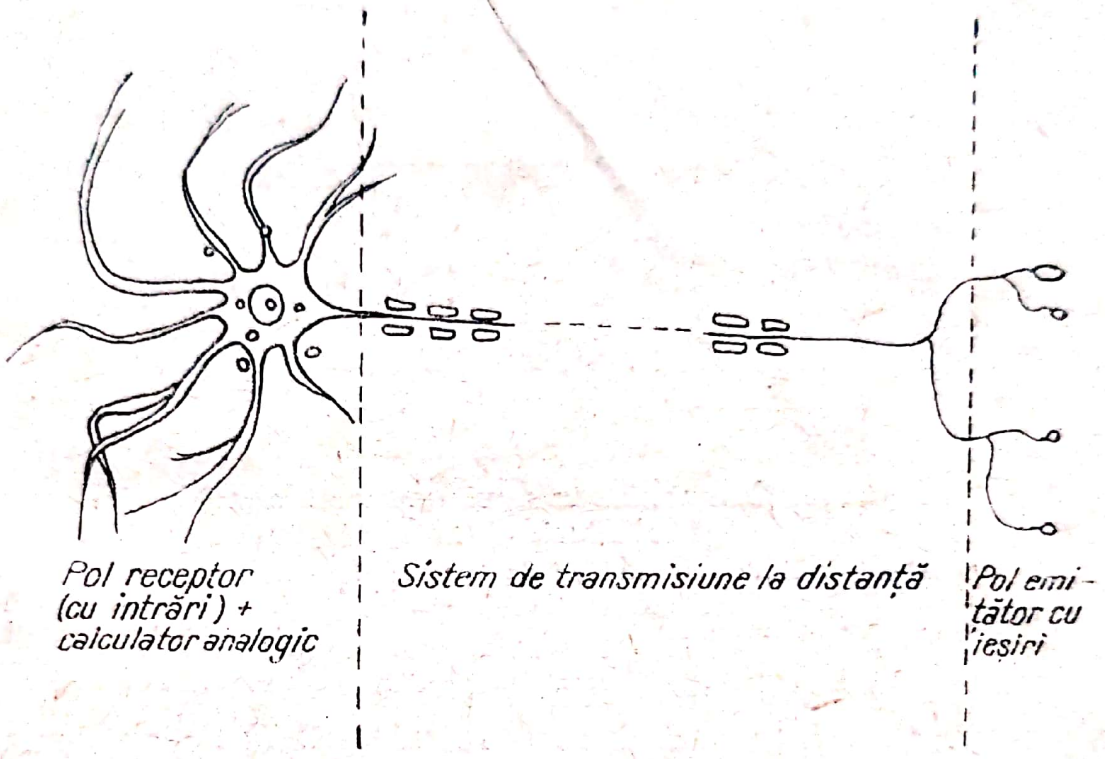


Fig. 3,5. Schema cibernetică a neuronului

tori sau codificatori, care transformă mărimea chimică excitantă într-o mărime electrică (potenţialul de acţiune). Potenţialul de acţiune este semnalul electric intraneuronal.

Ieșirea din neuron este reprezentată de substanța activă secretată de acea porţiune a membranei terminale care se numește membrană presinaptică și care se comportă tot ca un traductor sau decodificator ce transformă mărimea electrică a potenţialului presinaptic într-o mărime chimică (fluxul de substanţă activă emis de membrana presinaptică). Variaţiile acestui flux constituie semnalul de ieșire din neuron.

Între intrări și ieșiri se situează dispozitivele de sumare, de memorare, de generare de impulsuri, de transmisiune a impulsurilor, de decodare a impulsurilor care, în ansamblu,

formează un foarte complex canal de transmisiune și al cărui comportament poate fi asemuit cu acela al unui calculator electronic.

Datorită impulsurilor egale — conform legii tot sau nimic, — modulate în frecvență, sistemul cibernetic neu-

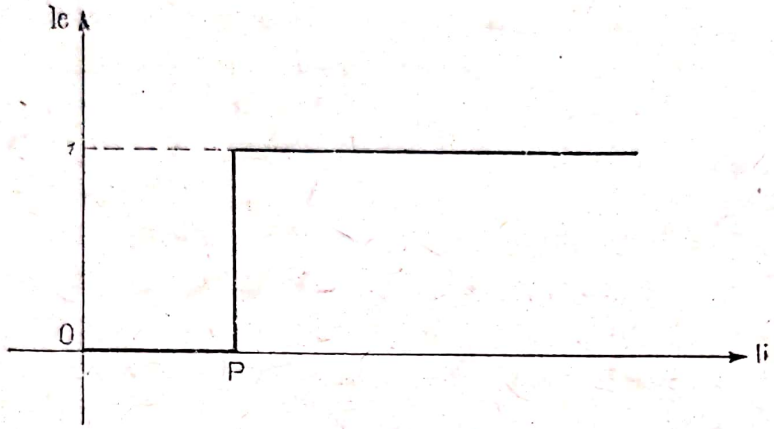


Fig. 3,6. Caracteristica unui neuron binar (tip McCulloch și Pitts)

I_i — intensitatea semnalului de intrare; I_e — intensitatea semnalului de ieșire; P — pragul

ronal a fost și mai este considerat de mulți autori drept un sistem digital (binar) care ar folosi un cod binar de tipul da sau nu (1 sau 0).

După cum reiese însă din descrierea matematică a fenomenelor neuronale expuse, se vede că potențialul de acțiune postsinaptic, la intrare, potențialul de acțiune somato-dendritic și potențialul de acțiune presinaptic, la ieșire, sînt gradate, adică amplitudinea lor variază continuu după o anumită lege, în funcție de mărimea excitantului. Cu alte cuvinte, potențialele amintite sînt de tip analogic, fapt asupra căruia a insistat și Bishop.

Nu numai atît, dar chiar impulsurile axonale nu au nimic de tip digital, deoarece ele se comportă ca un sistem de telecomandă ce folosește modulația în frecvență. În axon, perioada (care separă impulsurile succesive) are o lungime ce traduce (grație unei anumite legi cantitative) mărimea stării de excitație a neuronului. Și la acest nivel frecvența impulsurilor (sau lungimea perioadei

ce separă impulsurile) variază continuu, în funcţie de starea membranei somatodendritice.

Deci, întreg neuronul se comportă ca un sistem care transmite, combină şi stochează informaţiile într-un mod similar aceluia după care funcţionează un calculator analogic.

Succesiunea de operaţii elementare, efectuate în interiorul neuronului, conform schemei logice expuse, şi potrivit legilor cantitative descrise de relaţiile matematice prezentate, determină trecerea de la mărimea semnalelor de intrare la mărimea semnalelor de ieşire. *Funcţia de transfer* a neuronului, care trebuie să exprime ansamblul operaţiilor pe care le efectuează, nu poate fi încă dată, deoarece deocamdată nu se cunosc date suficiente asupra modului de funcţionare a porţiunii terminale a neuronului şi a sistemului de memorare.

Din punct de vedere informaţional, neuronul are o limită inferioară, care este determinată de zgomotul de fond al neuronului. Se ştie (Libet şi Gérard) că, în condiţii de repaus, potenţialul membranei somatodendritice prezintă mici fluctuaţii în jurul unei valori medii. Aceste fluctuaţii au o distribuţie statistică probabil normală. Ele se explică prin faptul că la baza lor stau fluctuaţiile fenomenelor termodinamice (energetice) complexe din neuronul în repaus.

De asemenea, se ştie că axonul în condiţii de repaus descarcă potenţiale de acţiune (vîrfuri), pe care le transmit în lungul lui. Aceste descărcări sînt neregulate, aleatorii şi exprimă şi ele fluctuaţiile echilibrului energetic neuronal care defineşte starea de repaus.

Unii autori (Pecker) au pus în evidenţă fluctuaţii ale pragului de excitaţie neuronal. Aceste fluctuaţii ale valorii prag se fac după o curbă gaussiană, de o parte şi de alta a unei valori medii. Fluctuaţiile pragului sînt tot expresia caracterului fluctuant — statistic sesizabil — al metabolismului celular. Landal a tratat matematic această problemă.

Am văzut că şi la ieşirea din neuron membrana presinaptică emite un flux neregulat de repaus de substanţă

Scanned with OKEN Scanner

activă. Toate aceste fenomene definesc zgomotul de fond al sistemului neuron-sinapsă. Acest zgomot de fond condiţionează, din punct de vedere informaţional, pragul funcţional al neuronului.

Sînt neuroni care în repaus descarcă autoritmic în lungul axonului, impulsuri cu o anumită frecvenţă (ex.

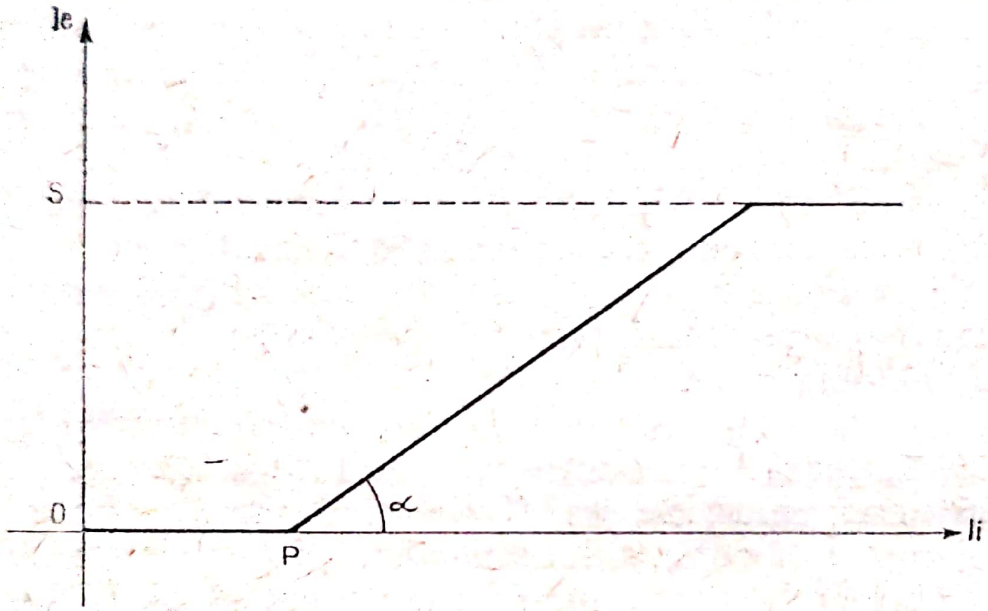


Fig. 3,7. Caracteristica unui neuron analogic nebinar I_i – intensitatea semnalului de intrare; I_e – intensitatea semnalului de ieşire; P pragul; S valoarea de saturaţie; α – pantă caracteristică

neuronii ganglionului lui Scarpa). Această frecvenţă regulată de repaus nu are semnificaţia unui zgomot, ci a nivelului de zero al sistemului de semnalizare utilizat de neuronul respectiv.

Anumite semnale chimice, la intrarea în neuron, măresc, în funcţie de mărimea lor, frecvenţa acestui ritm de repaus. Alte semnale chimice micşorează acest ritm, tot în funcţie de mărimea lor. În felul acesta, neuronii de acest tip indică nu numai mărimea semnalului chimic excitant, dar şi calitatea lui (ceea ce sporeşte capacitatea de informaţie a neuronului considerat). În aceşti neuroni, limita inferioară a capacităţii informaţionale e dată de fluctuaţiile neregulate, într-un sens sau altul ale frecvenţei

de repaus a descărcărilor neuronale, fluctuații care aci au rolul de zgomot de fond și al căror substrat este condiționat tot de termodinamica proceselor celulare.

De aici rezultă că activitatea unui neuron se poate desfășura în cadrul unui domeniu de frecvențe a cărui limită inferioară e zero sau e reprezentată de frecvența de repaus (cînd există), și a cărei limită superioară este reprezentată de frecvența de saturație.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul IV

REȚELE NEURONALE

A. REȚELE PAUCINEURONALE

IV. 7. *Generalități.* În cadrul sistemului nervos, neuronul și sinapsele sale sînt înglobate într-un ansamblu de celule nervoase care, în creierul uman, numără pînă la $15 \cdot 10^9$ neuroni. Informațiile — excitațiile și inhibițiile — circulă prin acest ansamblu pe anumite circuite, dintre care unele sînt date ontogenetic, iar altele se structurează în cursul vieții individului. Neurocibernetica își propune să precizeze geometria distribuției spațiale a traseelor informaționale în ansamblul neuronal, deoarece de această distribuție depind unele dintre proprietățile sistemului nervos. Distribuția informației în sistemul nervos nu are însă numai un caracter spațial, ci și unul temporal.

Sistemul nervos poate fi considerat ca o rețea, al cărei element este neuronul. În rețelele nervoase neuronul nu este însă niciodată un element izolat.

a. Membrana somatodendritică a neuronului primește informații prin contactele sinaptice dispuse pe ea, aceste contacte sinaptice provenind de obicei de la mai mulți neuroni. De asemenea, trebuie subliniat faptul că între doi neuroni nu se stabilește contactul printr-o sinapsă unică, ci printr-un grup de sinapse.

Termenul de reflex monosinaptic nu este corect, el se referă la un arc reflex format din doi neuroni separați printr-un singur nivel sinaptic, realizat însă prin sinapse multiple, dispuse în paralel. Termenul indică doar faptul că între cei doi neuroni nu se află intercalați alți neuroni, ceea ce ar spori implicit numărul nivelurilor sinaptice.

Forma contactelor sinaptice este foarte variată, așa cum rezultă din figura 4,1.

Scanned with OKEN Scanner

Articulația funcțională a doi neuroni nu depinde numai de mărimea suprafeței sinaptice realizate, ci de asemenea de distribuția sinapselor respective. Reamintim, de asememea, că unele sinapse sînt excitatorii, iar altele inhibitorii.

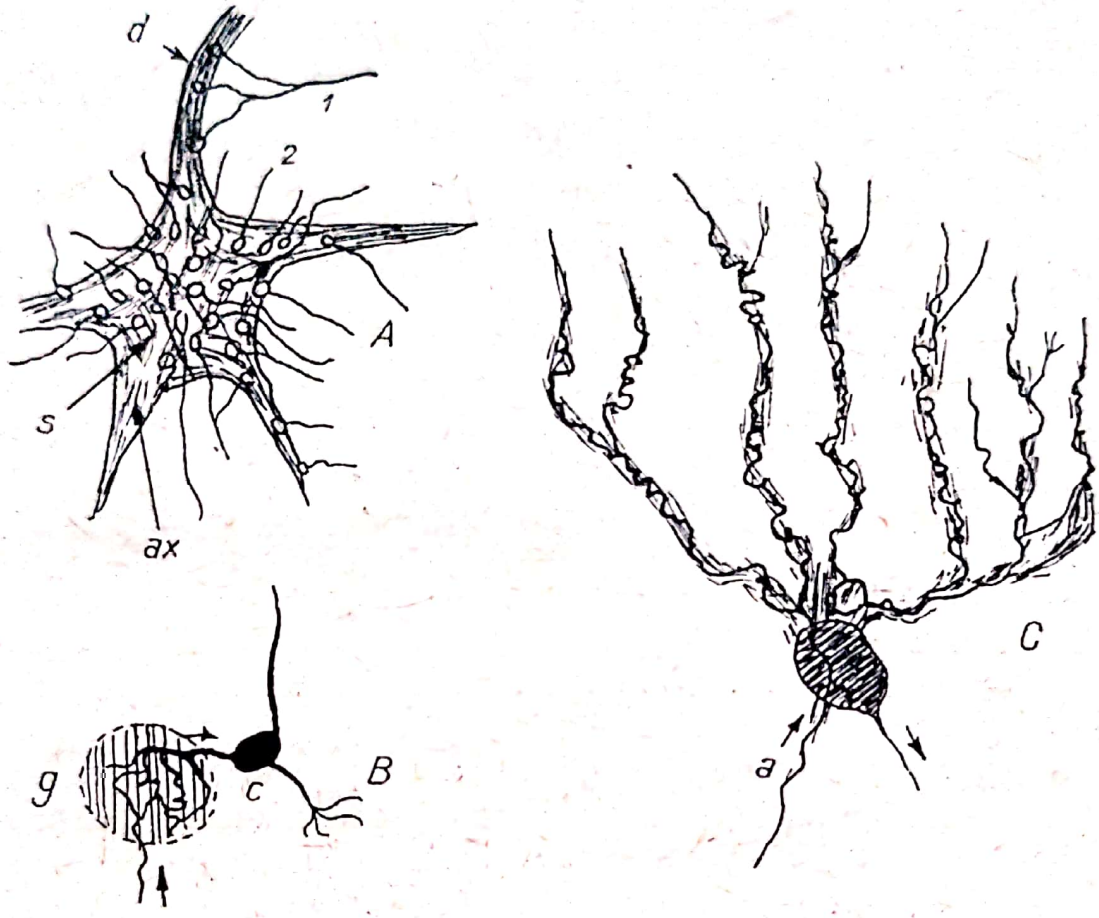


Fig. 4,1. Diferite tipuri de sinapse neuroneuronale

A – Motoneuron; **s** – soma; **d** – dendrită; **ax** – axon (regiunea axonului nu primește sinapse); **1** – sinapsă axodendritică; **2** – sinapsă axosomatică;
B – Celulă granulară din cerebel; **c** – celula granulară; **g** – glomerulul (unde sînt sinapsele axodendritice)
C – Celulă Purkinje din cerebel; **a** – fibră agățătoare aferentă care se aplică pe dendrite și realizează contacte sinaptice multiple cu acestea

Totdeauna însă, mesajele emise de diferitele sinapse de ieșire ale unui aceluiași neuron sînt de același tip (toate excitatorii sau toate inhibitorii). De asemenea, toate au semnale proporționale, unele în raport cu celelalte, căci toate traduc starea aceluiași neuron.

Pot apărea doar unele diferențe temporale între mesajele de ieșire emise de membrana terminală a unor cola-

terale axonale și cele ale terminațiilor axonale propriu-zise, diferențe care țin de timpul de propagare a semnalului de-a lungul axonului.

Un neuron își trimite mesajele sale de ieșire numai în cazuri rare spre un singur alt neuron. De obicei, un neuron excită sau inhibă simultan mai mulți neuroni.

b. Luînd în considerare multiplicitatea conexiunilor aferente și eferente ale fiecărui neuron, ne dăm seama de complexitatea rețelei nervoase. Ea poate fi apreciată în primul rînd morfologic. O metodă superioară constă în investigarea electrofiziologică, tehnica modernă permițînd unele sondaje care ajută la progresul înțelegerii modului de comportare a neuronilor și a rețelelor neuronale. În acest sens s-au făcut unele aproximări interesante, cum sînt, de exemplu, cele privind structura sinaptică a cortexului (Lorente de Nô, von Bonin, Sarkissov), a cerebelului (Cajal), a formației reticulare (Brodal) etc.

Pentru descifrarea mai profundă a modului de funcționare a sistemului nervos se poate utiliza analogia cu rețelele electrice cu contacte și relee. Această metodă a fost utilizată în unele cazuri.

Neurocibernetica își propune însă, ca metodă generală de lucru, explicarea funcționării agregatelor neuronale cu ajutorul unor modele matematice și logice și chiar a unor modele electronice, care, evident, completează și se ghidează în permanență după datele experimentale.

IV. 2. *Tratarea matematică a rețelelor neuronale.* a. O primă tratare a modului de interacțiune neuronală în cazul unei rețele pleacă de la ecuațiile diferențiale ale excitației neuronale.

Pe baza ecuațiilor diferențiale respective se stabilește apoi, din aproape în aproape, starea fiecărui neuron, considerînd mărimea de ieșire a unui neuron drept mărimea de intrare în neuronul următor. De aci, se poate determina o expresie generală care să permită calcularea stării oricărui neuron. Metoda presupune însă cunoscută distribuția spațială a neuronilor.

Scanned with OKEN Scanner

Metoda a fost utilizată de Rashewsky, Landahl, Haussholder ș.a.

Evident că relațiile finale la care se ajunge depind de tipul de ecuații de la care se pleacă. Atunci cînd se pleacă de la relații simple — sum sînt relațiile lui Blair, — rezultatele finale sînt și ele relativ simple; ele devin extrem de complexe în cazul în care se pleacă de la ecuațiile lui Young sau de la alte variante ale acestora.

b. Dacă se consideră elementele neuronale ca fiind de dimensiuni foarte mici și dispuse foarte dens, practic într-un continuu, atunci starea E_i a neuronului i dintr-un traseu, de-a lungul căruia s-a propagat informația de la neuronul E_0, poate fi exprimată ca o funcție $f(i)$ a numărului de ordine a neuronului i în traseul respectiv sau ca o funcție $u(x)$ de distanța x parcursă de informație. Într-o tratare cu metodele analizei matematice, admițînd că sîntem în prezența unui fenomen continuu, la limită, sumele devin integrale. Forma funcției $u(x)$ depinde de distribuția constantelor neuronale considerate. În acest caz, rețeaua nervoasă este considerată ca un cîmp. Dat fiind caracterul neliniar al aranjamentului conexiunilor interneuronale, descrierea analitică propusă se lovește de complexități matematice foarte mari, ceea ce reflectă în fond complexitatea sistemului biologic. În același timp, trebuie observat că această metodă nu corespunde realității fiziologice, deoarece, de fapt, cîmpurile neuronale nu formează domenii continue, ci structuri discrete, deci apriori se poate spune că aplicarea metodelor analizei matematice (a teoriei cîmpurilor) este prea aproximativă.

IV. *3. Tratarea logică a rețelelor neuronale.* a. Rețele de neuroni binari. McCulloch și Pitts au propus un alt mod de tratare a rețelelor neuronale, considerînd fiecare neuron drept un element cu numai două stări (starea de excitație și starea de repaus sau de inhibiție), astfel încît întreaga rețea poate fi considerată ca avînd o funcționare binară căreia i se poate aplica algebra booleană.

La fiecare neuron sosesc terminațiile efectorii ale altui neuron. Sinapsele sînt de două feluri: excitatoare și inhi-

bitoare. Fiecare neuron este caracterizat printr-un anumit prag. Pentru ca un neuron să treacă în starea de excitație trebuie ca suma semnalelor care îi sosesc prin sinapsele respective să depășească pragul. De îndată ce

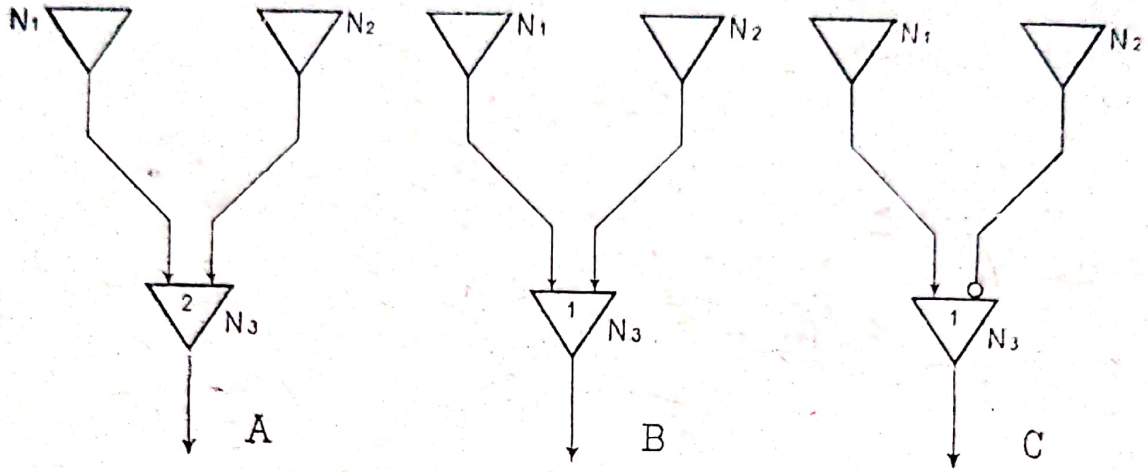


Fig. 4,2. Rețelele neuronale booleene ale lui McCulloch și Pitts
▽ – neuron; ↓ – sinapsă excitatorie; ○ – sinapsă inhibitorie; 1,2 – valoarea pragului neuronului respectiv; A – $N_3 \subset N_1 + N_2$; B – $N_3 \subset N_1 \vee N_2$; C – $N_3 \subset N_1 + \neg N_2$

pragul a fost depășit, neuronul produce la ieșire un semnal a cărui intensitate este independentă de excitația de la intrare.

În modelul McCulloch și Pitts se consideră și rețele care evoluează în timp, timpul fiind cuantizat în întîrzieri sinaptice, adică el se consideră numai în anumite momente discrete.

În figura 4,2 se reprezintă schemele logice fundamentale ale modelului considerat.

În figura 4,2 *A* se reprezintă o rețea trineuronală care realizează funcția de conjuncție. Neuronul N_3 are pragul 2 și el produce la ieșire un semnal în momentul t numai dacă în momentul precedent $(t-1)$ neuronii N_1 și N_2 au fost în stare de excitație, ceea ce corespunde următoarei expresii:

$$N_1(t-1) + N_2(t-1) \supset N_3(t).$$

În figura 4,2 *B* se reprezintă o rețea trineuronală disjunctivă. Neuronul N_3 are pragul 1. În momentul t

el este excitat numai dacă în momentul $t - 1$ este excitat sau neuronul 1 sau neuronul 2. „Sau" trebuie înțeles în sensul termenului latin *vel* sau în sensul logicii matematice, și anume că nu are un înțeles exclusiv, ci că el poate semnifica și realizarea simultană a ambelor posibilități.

Relația dintre stările celor trei neuroni se redă astfel:

$$N_1(t-1) \vee N_2(t-1) \supset N_3(t).$$

În schema din figura 4,2 *C*, neuronul N_3 are pragul 1 și este în legătură cu neuronul N_1 — printr-o sinapsă excitatorie — și cu neuronul N_2 — printr-o sinapsă inhibitorie. Pentru ca la momentul t neuronul N_3 să fie excitat, este necesar și suficient ca în momentul precedent neuronul N_1 să fie excitat, iar neuronul N_2 să nu fie excitat:

$$N_1(t-1) + N_2(t-1) \supset N_3(t).$$

Plecînd de la aceste modele simple, se pot realiza modele din ce în ce mai complexe.

În figura 4,3 se reprezintă schema logică a unei rețele care realizează doar o întîrziere. Funcțiile logice asociate ale acestei rețele sînt:

$$N(t-2) \supset P(t-1) \supset Q(t)$$

Doi neuroni grupați sub forma unei rețele de întîrziere închisă pot funcționa ca un dispozitiv de memorare. În figura 4,4 se dau trei exemple de folosire a unui astfel de circuit.

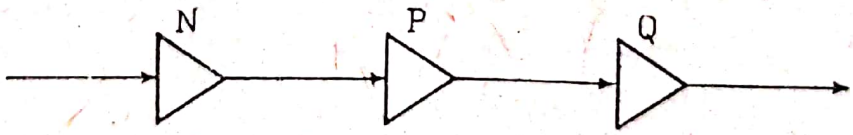


Fig. 4,3. Rețea de întîrziere

Se observă că neuronul N_{II} din figura 4,4 *A* este excitat la momentul t dacă neuronul N_I a fost excitat în momentul $t - 1$ sau în orice moment $t - n$ anterior. Funcția logică care descrie funcționarea circuitului este

$$N_I(t-n) \supset N_{II}(t) \qquad n = 0, 1, 2, \ldots, \infty$$

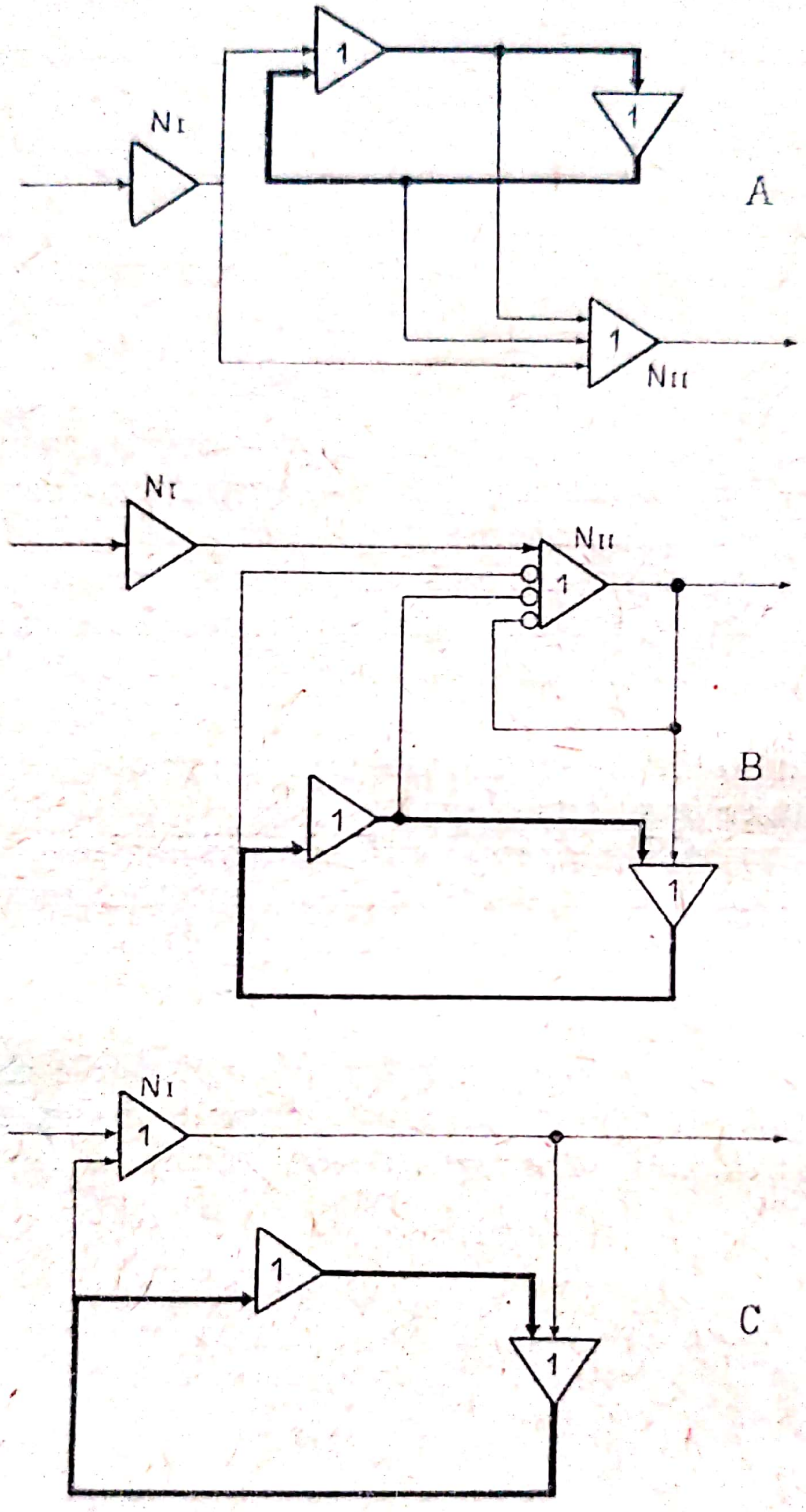


Fig. 4,4. Rețele cu operator existențial nelimitat

Circuitul din figura 4,4 *B* se caracterizează prin aceea că neuronul N_{II} este excitat dacă N_1 a fost excitat în momentul $t-1$ și dacă neuronul N_2 nu a fost excitat în acel moment sau în orice moment anterior acestuia.

Scanned with OKEN Scanner

Funcția logică a circuitului este

$$N_I\ (t-1)\ \&\ \neg\ N_{II}\ (t-n) \supset N_{II}(t) \qquad n = 0, 1, 2, \ldots, \infty$$

Rețeaua din figura 4,4 *C* are proprietatea că neuronul N_1 este excitat în momentul t, dacă a fost excitat în momentul $t-2$ sau în orice moment $t-2n$ anterior. Funcția sa logică este

$$N_I(t-2-n) \supset N_I(t) \qquad n = 0, 1, 2, \ldots, \infty$$

Se poate folosi simbolul $(\exists x)N(x)$ pentru a reprezenta faptul că $N(x)$ există pentru orice valoare a lui x. Circuitul de memorie din figura 4,4 materializează operatorul existențial nelimitat.

Operatorul $(\exists x)KN(x)$ poartă denumirea de *operator existențial limitat*, deoarece indică faptul că $N(x)$ este valabil pentru orice valoare a lui x de la 0 la K. Un model de rețea care să funcționeze ca un astfel de operator este redat în figura 4,5. Funcția sa logică este exprimată de relația

$$N_I(t-1-n) \supset N_{II}(t) \qquad n = 0, 1, 2, \ldots, k$$

Utilizînd rețele neuronale conjunctive, disjunctive, de întîrziere, de tipul operatorilor existențiali limitați

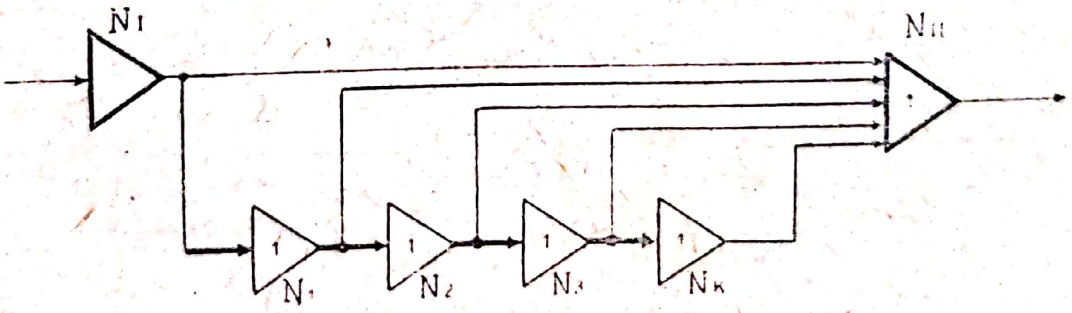


Fig. 4,5. Operator existențial limitat

și nelimitați, se pot realiza modele logice de rețele complexe care să modeleze toate funcțiile logice binare.

Modelele de rețele neuronale descrise de McCulloch și Pitts și apoi reluate de o serie întreagă de cercetători (Landahl, Rashewsky, Medvedev, von Neumann, Kleene

ș.a.) au reprezentat un progres real în înțelegerea cooperării funcționale a celulelor nervoase.

Toate aceste modele au însă dezavantajul că simplifică extrem de mult realitatea. După cum se știe, neuronul nu are un răspuns „tot sau nimic", în sensul că sau nu emite semnal sau emite un semnal care să aibe o amplitudine constantă. De fapt, neuronul are un răspuns gradat, informația fiind reprezentată de impulsurile modulate în frecvență de pe axon.

Un studiu mai apropiat de realitatea biologică trebuie să ia în considerare drept elemente de rețea un model de neuron care să funcționeze conform schemei logice prezentate anterior, cu alte cuvinte care să prezinte o relație gradată între mărimea semnal de intrare și mărimea semnal de ieșire. Tratarea propusă de noi pleacă de la schema logică a neuronului, bazată pe descrierea matematică a fenomenelor biofizice măsurabile, care definesc activitatea neuronală.

b. Rețele mononeuronale. Cel mai simplu tip de rețea este reprezentat de rețeaua mononeuronală. Un neuron poate prezenta mai multe tipuri de situații.

Un neuron care ar prezenta numai o singură intrare inhibitoare nu servește la nimic, dacă neuronul nu are o activitate spontană. În general, neuronii sînt considerați ca elemente fără activitate spontană.

Un neuron care prezintă o singură intrare excitatorie se comportă ca o stație-releu al cărei răspuns depinde de mărimea semnalului de intrare, dacă acesta depășește pragul. Cazul cel mai simplu este acela în care între semnalul de intrare S_i și semnalul de ieșire S_e există relația

$$S_e = a(S_i - i_0),$$

unde a este o constantă, iar i_0 este pragul neuronului.

Evident, se pot admite și alte tipuri de relații funcționale între neuroni. În particular, prezintă interes neuronii de tip L(logaritmici), la care

$$S_e = b \log (S_i - i_0)$$

și neuronii de tip E (exponențiali), la care

$$S_e = c \exp (S_i - i_0),$$

unde b și c sînt constante neuronale.

Bazîndu-ne pe observațiile lui Hartline asupra fibrelor optice, trebuie să mai considerăm și neuroni de tip D, (derivatori) la care

$$S_e = k \frac{dS_i}{dt}$$

unde k este o constantă.

Pentru fiecare din cele patru tipuri de neuroni, răspunsul neuronului depinde cantitativ, potrivit funcției sale de transfer, de suma algebrică a semnalelor de intrare excitatorii și inhibitorii. Răspunsul va avea o valoare cuprinsă între nivelul de zgomot și cel de saturație — potrivit caracteristicii neuronului considerat.

Evident, fiecare tip de neuroni poate să funcționeze numai dacă semnalul de intrare are o valoare cuprinsă între anumite limite.

Considerarea factorului timp nu se poate rezuma numai la întîrzierea sinaptică, ci trebuie avută în vedere și durata propagării prin fiecare neuron, durata de sumare, durata perioadei de instalare a stării de excitație a fiecărui neuron (timpul de reacție). Acestea sînt principiile fundamentale de care trebuie să se țină seama atunci cînd se face analiza logică a rețelelor neuronale reale. Cu ajutorul lor se pot regăsi rețelele paucineuronale (cu puțini neuroni), descrise și în cazul modelului lui McCulloch și Pitts, dar posibilitățile acestor aranjamente sînt mult mai mari decît în cazul neuronilor binari.

c. Rețele paucineuronale. Studiul acestor rețele nu constituie doar o simplificare metodologică, deoarece asemenea rețele se întîlnesc realmente în sistemul nervos al nevertebratelor inferioare. De asemenea, unele comportări ale sistemelor nervoase ale vertebratelor — chiar superioare — pot fi explicate cu ajutorul rețelelor paucineuronale întîlnite în ganglionii vegetativi, segmentele medulare etc.

Scanned with OKEN Scanner

Rețelele paucineuronale pot realiza diferite operații ; în cele ce urmează se vor da cîteva exemple de astfel de rețele.

Se păstrează reprezentarea simbolică din cazul rețelelor binare. Neuronul este reprezentat printr-un triunghi, intrările fiind reprezentate ca venind la baza triunghiului. Întrările excitatorii se simbolizează prin săgeți sau linii simple, iar cele inhibitorii prin cercuri. Cifra din interiorul neuronului reprezintă, la o scară convențională pragul de excitație al neuronului, unitatea fiind aceeași pentru intreaga rețea. Se convine ca semnalele excitatorii să aibă valori pozitive, iar cele inhibitorii valori negative.

IV, *4. Rețele ON*. Aceste rețele se caracterizează prin aceea că produc un semnal la ieșire numai pentru perioada de început a semnalului aplicat.

Se consideră un semnal de intrare $S_i(t) = cT(t, d)$ unde $T(t,d)$ este funcția top

$$T(t,d) = \begin{cases} 0 & d < t < 0 \\ 1 & 0 < t < d \end{cases}$$

iar c este amplitudinea semnalului la intrare.

La rețelele *ON* semnalul la ieșire este $s_e(t)$

$$S_e(t) = \begin{cases} 0 & a + b < t < a \\ c_i & a < t < a + b \end{cases}$$

unde a este timpul de latență al neuronului N_1, b timpul de latență (întîrzierea) din bucla de reacție, iar c_i amplitudinea semnalului la ieșire.

Se observă că

$$S_e(t) = c_i\, T(t - a, b).$$

Semnalul aplicat la intrarea S_i se propagă pe cale directă la neuronul 1 pe care îl excită : a reprezintă timpul de latență al neuronului 1. Pe calea II intervine neuronul 2, care introduce timpul de latență b. În momentul $t_0 + a + b$, prin sinapsa inhibitorie, neuronul 1 se inhibă și nu mai produce semnal la ieșire.

Scanned with OKEN Scanner

În concluzie, la ieșire se obține semnal numai pentru o perioadă care corespunde cu începutul semnalului excitator.

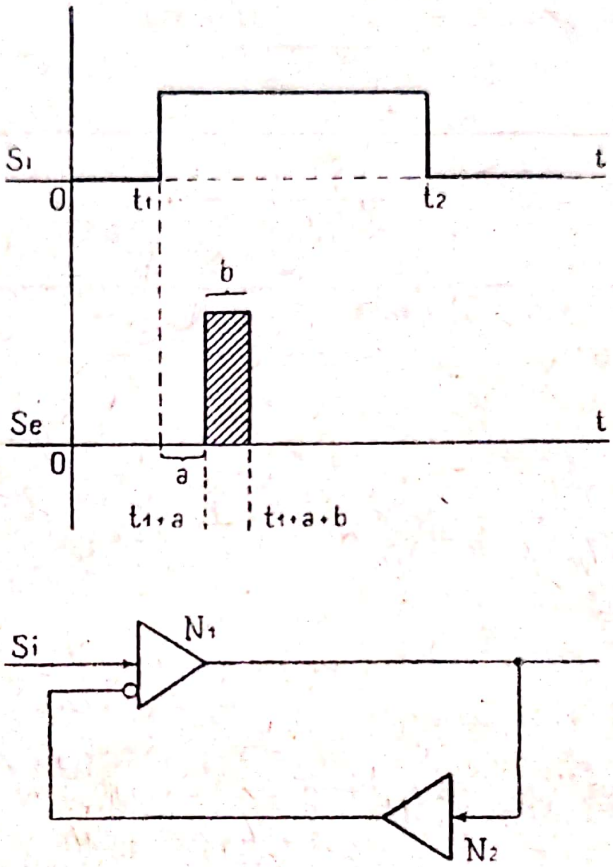


Fig. 4,6. Rețea și răspuns ON

S_i – semnal de intrare; S_e – semnal de ieșire; a – timpul de latență al lui N_1; b – timpul de latență al circuitului de reacție

IV. 5. *Rețele OFF*. Aceste rețele se caracterizează prin aceea că produc un semnal la ieșire numai pentru perioada de încetare a semnalului aplicat la intrare.

Schema unei astfel de rețele se redă în figura 4,7. Aplicînd la intrare semnalul

$$S_i(t) = cT(t,d)$$

semnalul la ieșire este

$$S_e(t) = c'T(t - d - a', b'),$$

unde a' este timpul în care semnalul parcurge calea I de la intrarea i la neuronul 1, iar $a' + b'$ este timpul în care semnalul parcurge calea II.

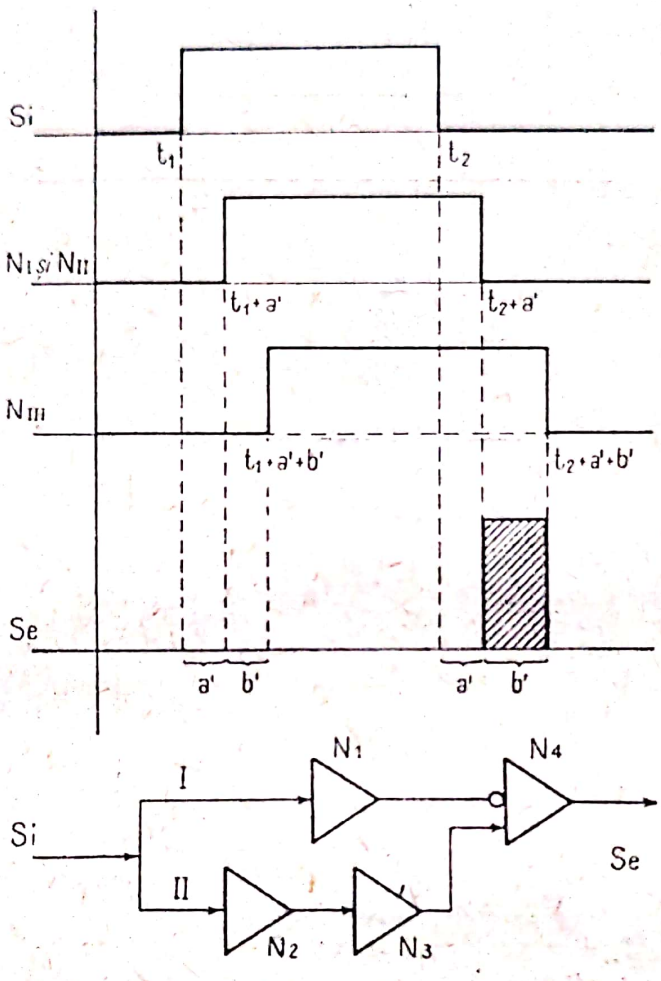


Fig. 4,7. Rețea și răspuns OFF

S_i – semnal de intrare; S_e – semnal de ieșire;
a' – timp de latență al neuronilor N_1 și N_2;
b' – timp de latență a sistemului de întîrziere N_3

IV. 6. *Rețele ON — OFF.* Dacă la intrare se aplică semnalul

$$S_i(t) = cT(t,d),$$

semnalul la ieșire este

$$S_e(t) = c'T(t - a,b) + c'T(t - a',b').$$

O rețea care prezintă o astfel de comportare este redată în figura 4,8. Pe calea I se realizează — împreună cu neuronul 1 — o rețea ON, iar căile II și III — împreună tot cu neuronul 1 — constituie o rețea OFF.

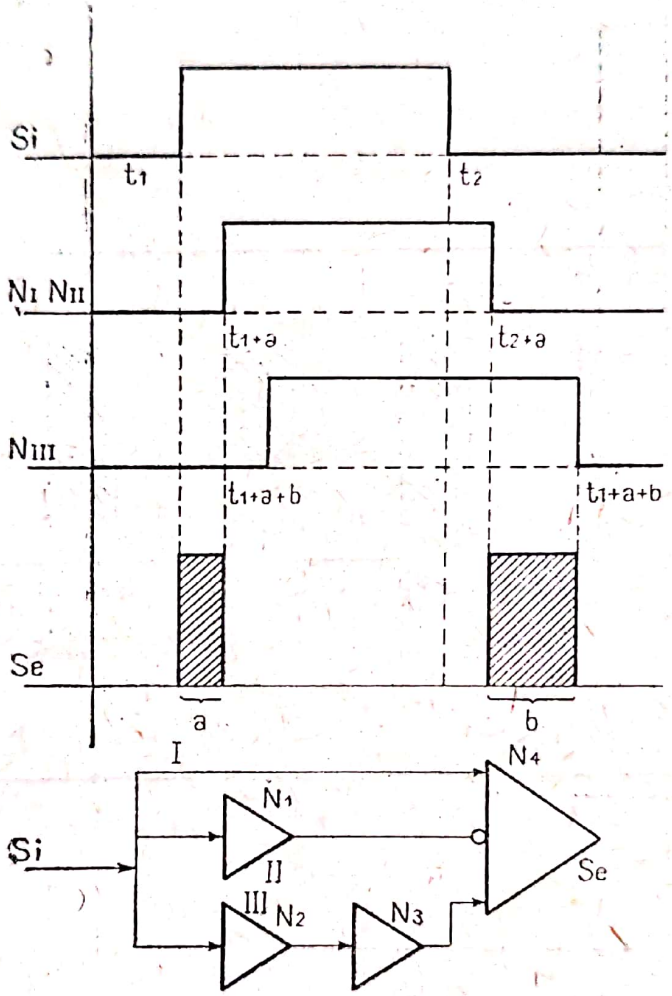


Fig. 4,8. Răspuns și rețea ON–OFF. Legenda ca în figura precedentă

IV. 7. *Rețele reverberante.* În figura 4, 9 se reprezintă o rețea neuronală formată din două rețele parțiale, avînd funcțiile de transfer A_1 și A_2, sau din doi neuroni N_1 și N_2. Aplicînd la intrare, în momentul t_0, un impuls de scurtă durată și de amplitudine c, el revine la intrare după un timp $a + nb$ $(n = 0, 1, 2, \ldots)$

IV. *8. Rețele pentru accentuarea contrastelor.* Aceste rețele sînt în fond rețele care măresc diferența între stimulii Si_1 și Si_2 care vin pe două căi. Schema unei astfel de rețele se dă în figura 4, 10.

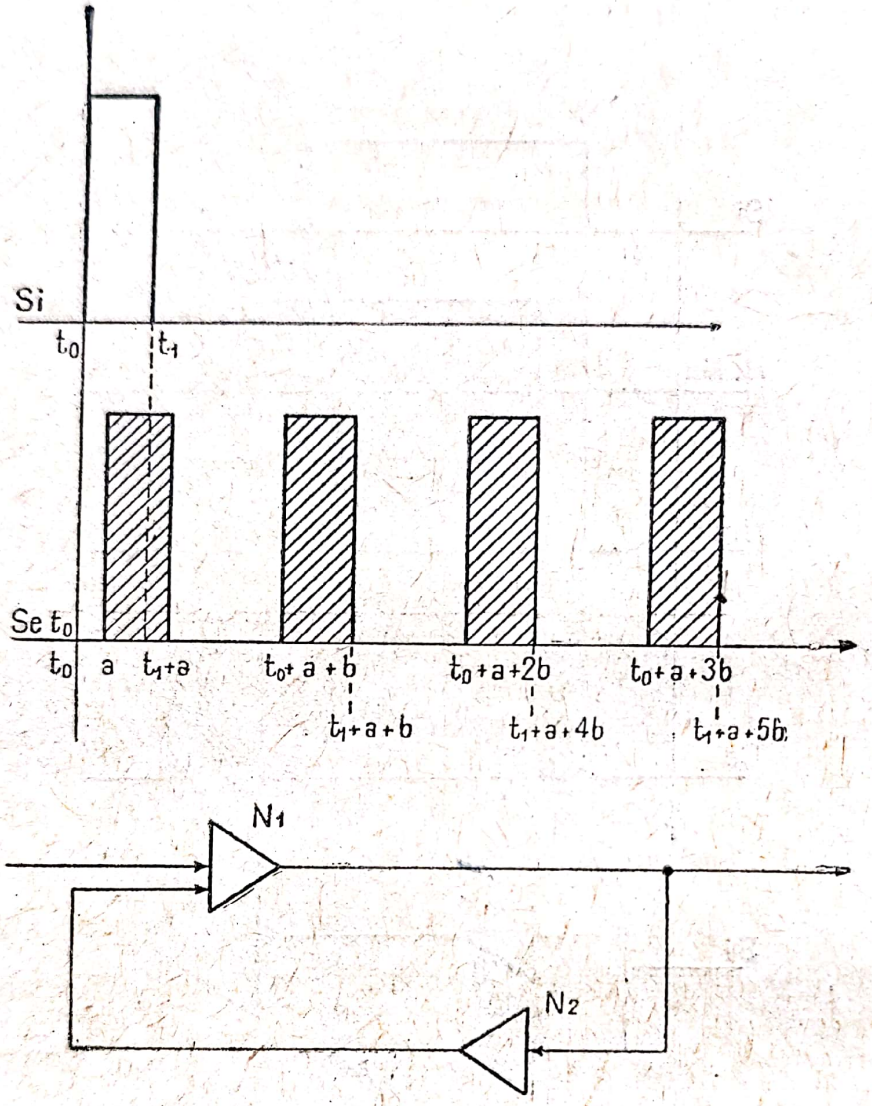


Fig. 4,9. Răspuns și rețea reverberantă

S_i – semnal de intrare; S_e – semnal de ieșire; a – timp de latență a neuronului N_1; b – timp de latență a sistemului de întîrziere (N_2+N_1)

La limită, această rețea poate deveni o rețea de inervare reciprocă.

IV. *9. Rețele care calculează funcția de corelație.* Prin definiție, funcția de corelație $F(\tau)$ între două funcții $f_1(t)$

și $f_2(t)$ este

$$F(\tau) = \lim \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} f_1(t) f_2(t - \tau) \mathrm{d}t.$$

Dacă $f_1(t) = f_2(t)$, se obține funcția de autocorelație, iar dacă $f_1(t) \neq f_2(t)$, se obține funcția de heterocorelație.

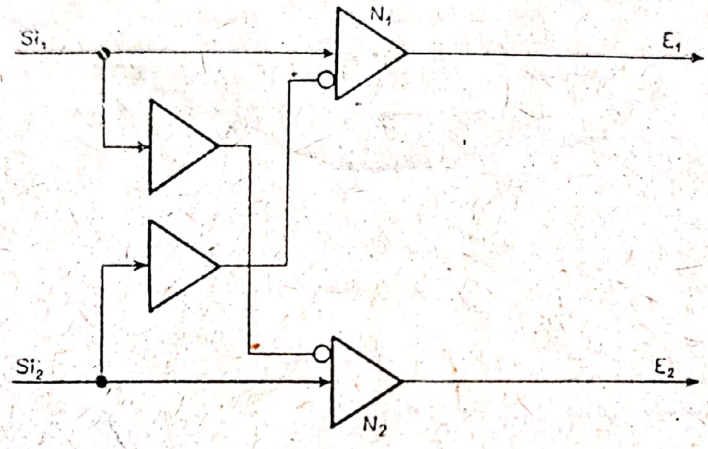


Fig. 4,10. Rețea pentru accentuarea contrastelor

Se poate introduce funcția

$$\Psi(\tau,t) = \frac{1}{t} \int_{0}^{t} f_1(t) f_2(t - \tau) \mathrm{d}t,$$

care reprezintă valoarea medie între momentele 0 și t a produsului de corelație

$$f_1(t) \cdot f_2(t - \tau)$$

Medierea se poate realiza cu ajutorul unui circuit neuronal M, redus eventual la un singur neuron sau chiar la o porțiune de membrană neuronală.

Relația de mai sus se mai poate scrie:

$$\Psi(\tau,t) = \frac{1}{t} \int_{0}^{t} h \mathrm{d}t \qquad h = \text{antilog } w$$

$$w = \log f_1(t) + \log f_2(t - \tau).$$

Argumentul întîrziat la termenul în care apare f_2 se realizează printr-o prelungire a căii pe care o parcurge semnalul f_2.

Relațiile de mai sus pot fi modelate cu ajutorul unei rețele ca aceea reprezentată în figura 4,11. Pentru a trece

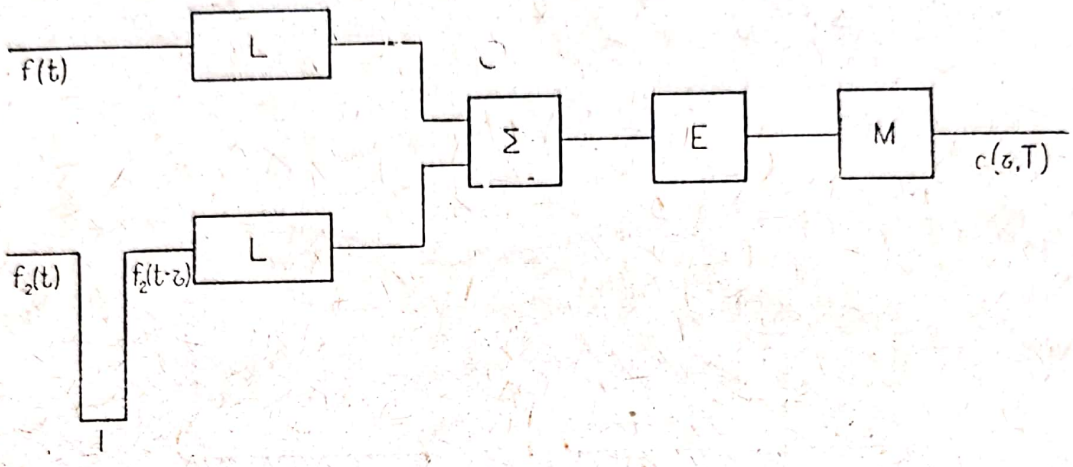


Fig. 4,11. Schema logică a unei rețele de corelație

$f_1(t)$ și $f_2(t)$ – semnale de intrare; $c(\tau, T)$ – semnalul de ieșire; I – dispozitiv de întîrziere; τ – întîrzierea realizată; L – dispozitiv de logaritmare; Σ – dispozitiv de sumare; E – dispozitiv de antilogaritmare; M – dispozitiv de mediere

de la w la h, se introduce un circuit de antilogaritmare (exponențiere).

Se menționează că funcția de exponențiere se poate realiza la nivelul sinapsei de ieșire a unui neuron.

Se vede deci că rețeaua care calculează funcții de corelație are o structură simplă. Aceasta explică de ce funcțiile de corelație din sistemul auditiv pot fi realizate de formațiuni neuronale relativ simple, cum ar fi oliva superioară și nucleul corpului trapezoid (C. Bălăceanu).

Există unele lucrări care arată că anumite reflexe optico-motorii se comportă ca și cum ele se bazează pe calcularea unei funcții de corelații (Reichardt).

IV. *10. Traductor intensitate-număr.* Este o rețea care are o singură intrare — la care se aplică un semnal de intensitate variabilă — și mai multe ieșiri. Numărul de ieșiri la care apare semnal depinde de intensitatea semnalului

Scanned with OKEN Scanner

de intrare. Astfel de rețele apar în cadrul sistemelor de recrutare. Sistemul neuronilor intercalari medulari funcționează pe acest principiu.

Schema unui traductor intensitate-număr se dă în figura 4, 12. Stimulul la intrare se aplică în paralel pe n

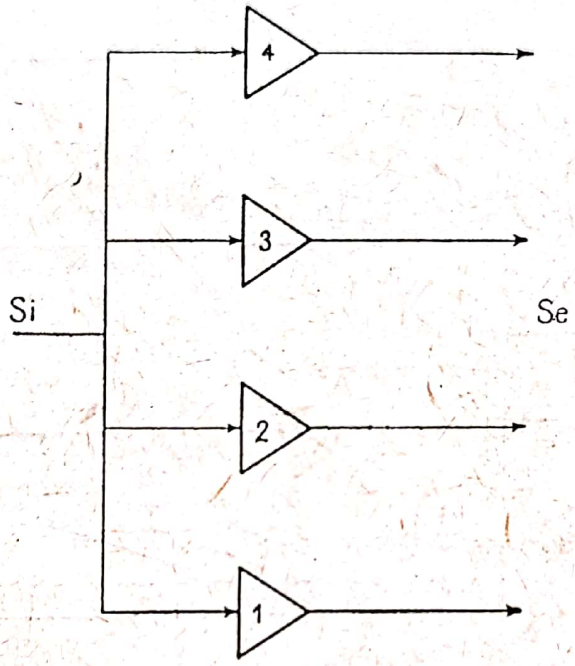


Fig. 4,12. Traductor intensitate-număr

S_i – semnal de intrare (variabila – intensitatea excitației); S_e – semnal de ieșire (variabila – numărul de canale de ieșire excitate); 1,2,3,4 – praguri crescătoare ale neuronilor

neuroni, avînd praguri diferite de valori crescătoare, 1, 2, . . . , n. Pentru un stimul de intensitate foarte slabă, sub valoarea 1, nu apare semnal la nici una dintre ieșiri. Crescînd intensitatea stimulului de la intrare, pe rînd sînt excitați tot mai mulți neuroni, pînă la saturarea traductorului.

IV. *11. Traductor intensitate-poziție* Este un traductor cu o singură intrare și cu mai multe ieșiri. La un moment dat, în funcție de intensitatea stimulului de la intrare, apare semnal doar la o singură ieșire. Astfel de traductori se pot

Scanned with OKEN Scanner

obține din traductorii intensitate-număr prin introducerea unor elemente inhibitorii. În figura 4,13 se dă schema unei astfel de rețele.

Astfel de traductori stau la baza transmiterii mărimii de referință în sistemele de reglare a homeostaziei.

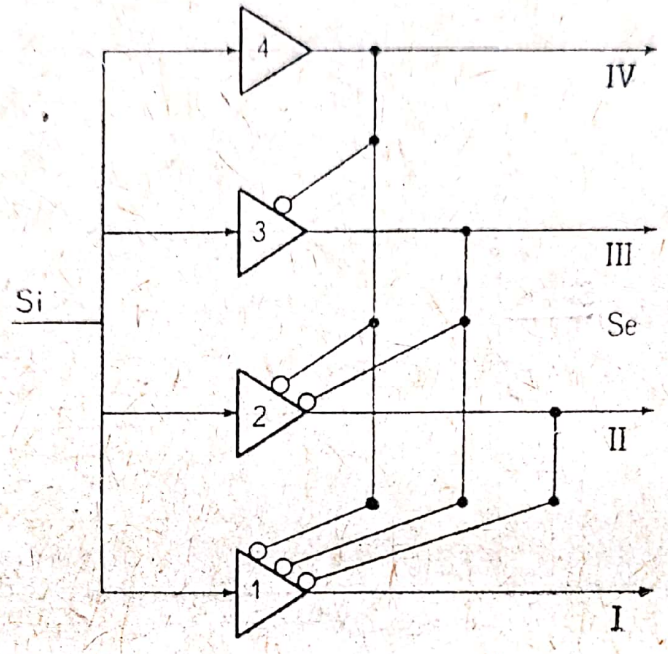


Fig. 4,13. Traductor intensitate-poziție
s_i – semnal de intrare (variabila – intensitatea excitației); s_e – semnal de ieșire (variabila – poziția canalului de ieșire); 1,2,3,4 – praguri crescătoare ale neuronilor

IV. *12. Rețele care recunosc forme elementare.* În această categorie intră rețelele care recunosc unele forme elementare, cum ar fi: linia dreaptă, sensul de mișcare a unei excitații pe retină etc.

Fie rețeaua reprezentată în figura 4,14, la care intrările sînt, de exemplu, o serie de celule din retină. Dispoziția spațială a acestor celule corespunde formei care trebuie recunoscută.

Dacă se excită, de exemplu, un mare număr din elementele unei zone formată din celule dispuse de-a lungul unei drepte, atunci la neuronul de sumare, care se află în legătură cu aceste celule, se depășește valoarea de prag și neuronul respectiv începe să emită semnale.

Scanned with OKEN Scanner

Acest tip de recunoaștere reclamă ca o condiție necesară excitarea unui număr minim de celule. Este însă necesar ca să fie îndeplinite și alte condiții suplimentare, ceea ce face ca această condiție să nu fie și suficientă. Dacă, de exemplu, se excită simultan toate celulele din

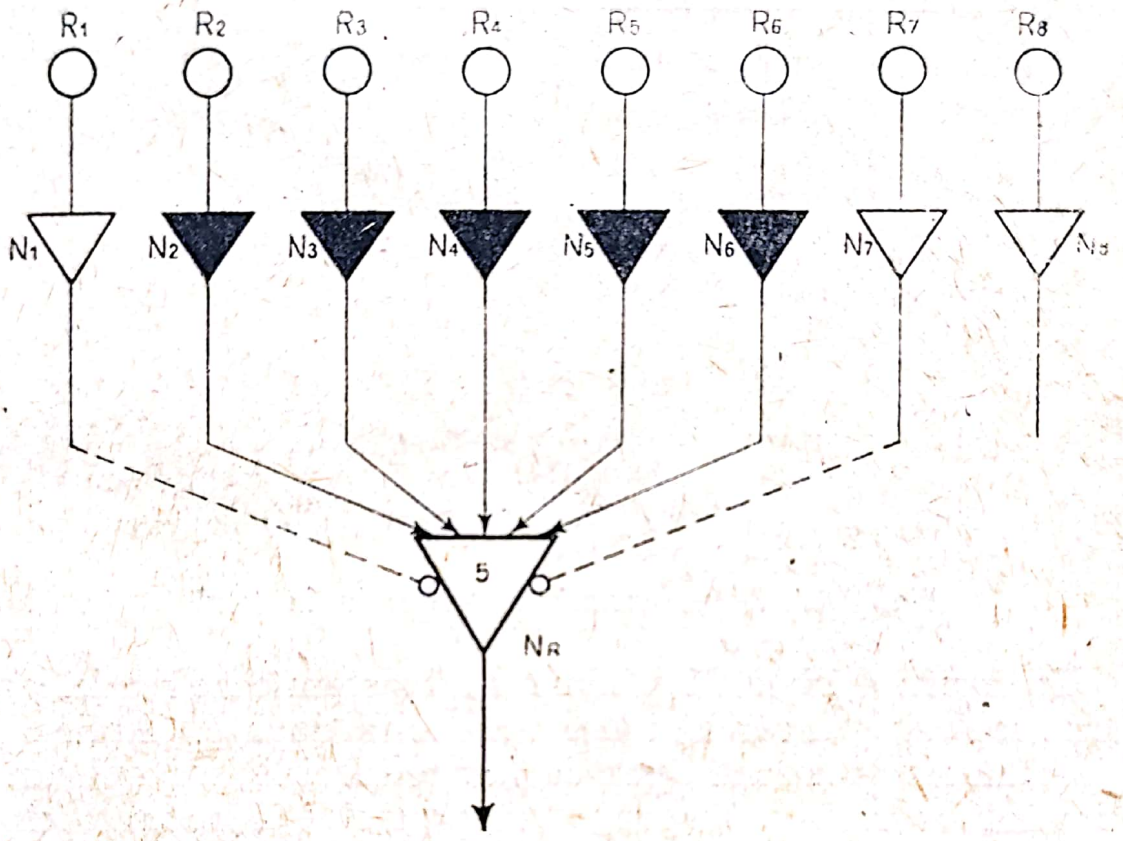


Fig. 4,14. Rețea de recunoaștere (Retină)

R – receptori; N – neuroni bipolari; N_R – neuron ganglionar (de recunoaștere);

retină care acoperă o zonă mai mare decît aceea în care se află celulele dispuse de-a lungul unei drepte, condiția enunțată mai sus este îndeplinită. Dacă însă nu s-ar lua unele precauții suplimentare, forma respectivă ar fi identificată, în mod fals, cu o linie dreaptă.

Pentru a se evita această situație, care conduce la o falsă recunoaștere, sistemul trebuie prevăzut și cu o serie de legături inhibitorii, care să asigure nu numai îndeplinirea unor condiții pozitive (excitarea celulelor dispuse de-a lungul unei drepte), dar și îndeplinirea unor condiții negative (neexcitarea altor celule, în afara celor dispuse de-a lungul unei drepte).

Scanned with OKEN Scanner

IV. *13. Rețele instruibile simple.* Rețelele instruibile simple constituie un model de sistem elementar care acumulează experiență. Ele se bazează pe faptul că neuronul dispune de un sistem de memorare.

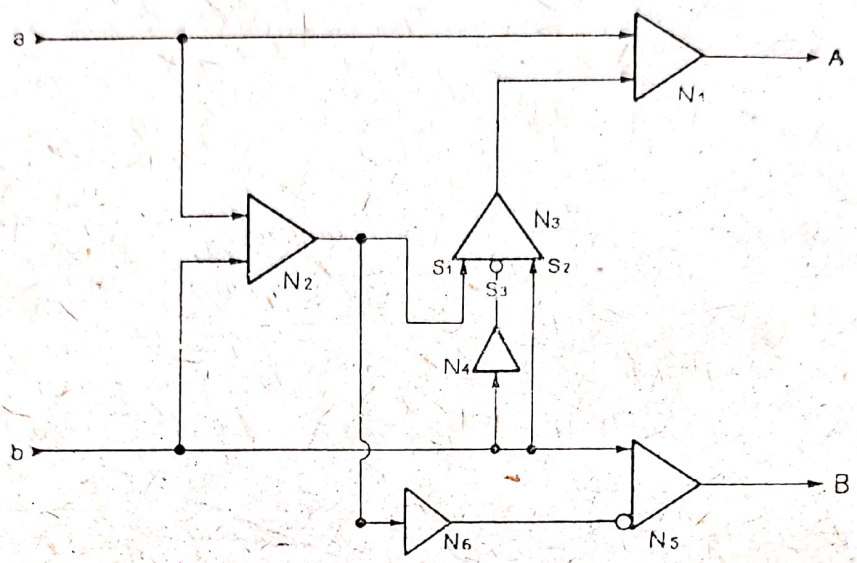


Fig. 4,15. Rețea instruibilă (legenda în text)

În figura 4,15 se dă schema unui sistem care modelează formarea și stingerea reflexelor condiționate. Aplicarea stimulului *a* provoacă apariția răspunsului *A*, iar aplicarea stimulului *b* provoacă apariția răspunsului *B*, atunci cînd rețeaua nu este încă instruită.

Dacă însă se aplică simultan stimulii *a* și *b*, atunci comportarea rețelei se schimbă, evoluînd în timp.

În etapa inițială, aplicarea lui *a* conduce la excitarea neuronului 1, care, la rîndul său, comandă desfășurarea procesului *A*. Dacă însă se aplică simultan stimulii *a* și *b*, atunci este declanșat și neuronul 2 care, la rîndul său, acționează asupra neuronului 3, prin sinapsa S_1. Acest neuron are proprietatea de a-și coborî pragul de excitabilitate în funcție de numărul excitărilor la care a fost supus.

Asupra neuronului 3 se exercită și influențele sinapselor S_2 și S_3. După un număr de asocieri ale stimulilor *a* și *b*, sinapsa S_1 fiind parcursă de multe ori, pragul neuronului 3 scade suficient de mult pentru ca un semnal care provine

de la b, prin sinapsa S_2, să provoace acțiunea neuronului 3 și deci a neuronului 1. Cînd se ajunge la această situație, constatăm, că s-a format reflexul condiționat, în sensul că stimulul b provoacă răspunsul A.

Aplicarea de mai multe ori a stimulului b izolat face ca prin neuronul 4 să fie acționată sinapsa inhibitorie S_3, care ridică pragul neuronului 3. Acționarea de un număr suficient de mare de ori a intrării b, fără a atrage după sine pierderea reflexului condiționat.

Pentru ca eventual neuronul 5 să nu fie acționat atunci cînd are loc coincidența semnalelor a și b, în rețea se poate prevede și neuronul 6, care inhibă neuronul 5 la aplicarea simultană a stimulilor a și b.

În realitate, pragul neuronului 3 depinde de raportul statistic dintre numărul de coincidențe $m = a \,\&\, b$ și de anticoincidența $n = a \,\&\, \neg\, b$. Aceasta înseamnă că valoarea h_3 a pragului neuronului 3 este o funcție de tipul

$$h_3 = f(r)$$
$$r = \alpha m + \beta n,$$

în care α și β sînt doi factori de proporționalitate.

Din cele expuse, se observă că rețelele paucineuronale pot comanda procese complexe, ele constituind baza morfofuncțională a sistemului nervos al nevertebratelor. Menționăm că multe dintre schemele cibernetice propuse în acest capitol se apropie — fără a coincide — cu schemele neuroanatomice propuse de Hanström la nevertebrate și, în special, cu schema paucineuronală instruibilă privind artropodele.

În cursul prezentei lucrări vom avea prilejul să prezentăm și alte modele logice de rețele neuronale.

Evident că o treaptă de evoluție mai complexă este reprezentată de creier, care conține o masă mare de neuroni. În cadrul cortexului cerebral se întîlnesc rețele pluri-neuronale care nu mai au caracterul clasic determinist al rețelelor paucineuronale, comportamentul lor neputînd fi studiat decît probabilistic.

În timp ce sistemul nervos al nevertebratelor inferioare (celenterate, platelminți, nematelminți) este structurat

Scanned with OKEN Scanner

exclusiv ca rețele paucineuronale deterministe (uneori cu număr fix de neuroni, ca în cazul nematodelor, care au 162 de celule nervoase), sistemul nervos al nevertebratelor superioare (cefalopode, artropode) și al vertebratelor cuprinde unele porțiuni care se comportă ca o rețea paucineuronală deterministă (ganglionii periferici, măduva spinării, unele porțiuni ale trunchiului cerebral etc.) și alte porțiuni (cu mult mai însemnate), care se comportă ca rețele plurineuronale probabilistice).

B. REȚELE PLURINEURONALE

În general, în sistemele nervoase ale ființelor vii mai evoluate se întîlnesc rețele formate dintr-un număr foarte mare de neuroni care, pentru unele specii, cuprind circa 10^{10} neuroni. Abordarea unor astfel de rețele se poate face în trei moduri principial diferite.

a. O primă metodă constă în considerarea rețelei neuronale ca rezultînd dintr-un număr de subrețele, avînd fiecare o structură dată, iar circulația semnalelor de la un neuron la altul făcîndu-se în conformitate cu topologia conexiunilor și proprietățile neuronilor. Pentru a cunoaște evoluția în timp a unei astfel de rețele, este necesar a ști starea inițială a rețelei, legăturile sinaptice dintre neuroni și semnalele la intrarea rețelei. În fond, este vorba de aplicarea la rețelele plurineuronale a metodelor matematice și logice utilizate la rețelele paucineuronale.

Evident, dificultățile de aplicare a acestor metode sînt cu mult mai mari, fiind dat numărul considerabil de neuroni care constituie rețeaua.

b. Alături de acest model, strict localizat determinist, s-a elaborat un model în care se încearcă aplicarea la studiul rețelelor plurineuronale a unei metode utilizate în fizica teoretică, în așa-numita teorie a cîmpului.

Prin definiție, un cîmp este un domeniu al spațiului, în care în fiecare punct se definește o serie de mărimi caracteristice, ale căror intensități nu sînt independente,

Scanned with OKEN Scanner

ci sînt corelate între ele prin anumite legi. Evoluția în timp și spațiu a acestor mărimi — numite mărimi de stare — depinde de poziția punctului considerat, de momentul respectiv, ca și de legile care leagă între ele mărimile de stare.

De exemplu, în cazul teoriei newtoniene a gravitației, întregul spațiu este caracterizat prin existența unui potențial gravitațional, mărimea instantanee a potențialului fiind dată de distribuția maselor. Mișcarea maselor se face sub influența acestui potențial și în conformitate cu legile mecanicii clasice.

La fel, în cazul cîmpului electromagnetic, se definește o serie de mărimi fundamentale (cîmp electric, cîmp magnetic etc.), intensitățile acestor mărimi fiind legate între ele prin ecuațiile lui Maxwell. În cazul teoriei maxwelliene, există unde electromagnetice care se propagă din aproape în aproape cu o viteză finită.

La fel și în cazul unei rețele neuronale se poate considera că semnalul inițial se propagă din aproape în aproape, așa cum cere teoria cîmpului în concepția actuală.

Este însă evident că pentru a aplica teoria cîmpului la rețelele neuronale trebuie să admitem că domeniul ocupat de aceste rețele formează un continuu, omogen sau neomogen, izotrop sau anizotrop. Este însă evident că realitatea biologică nu corespunde acestei reprezentări, avînd în vedere caracterul discontinuu al rețelelor neuronale.

Teoria cîmpului, aplicată rețelelor neuronale, permite o abordare cantitativă, în special, a efectelor hormonilor, ca și a altor substanțe chimice aplicate sistemului nervos. În acest caz însă, nu este vorba de propagarea semnalelor nervoase, ci de difuzia substanțelor chimice în cîmpurile neuronale, ceea ce este cu totul altă problemă, care iese din cadrul neurociberneticii. În adevăr, pentru difuzia substanțelor în interiorul unui mediu dat se poate aplica teoria cîmpului.

c. O altă metodă de abordare cantitativă a rețelelor plurineuronale este metoda probabilistică. În această metodă nu se mai face abstracție de caracterul discon-

tinuu spațial al rețelei neuronale, ci se ia în considerare numărul a_i de terminații axonale pe care le are fiecare neuron i. Numărul a_i corespunde cu numărul de neuroni spre care neuronul i trimite impulsuri nervoase.

Într-o primă variantă se evaluează — prin diferite metode electrofiziologice sau histologice — probabilitatea $p(a_i)$ ca neuronul i să emită a_i terminații axonale.

În a doua variantă se evaluează densitatea axonală medie — adică numărul total de ramificații axonale, observat la toți neuronii unei rețele, raportat la numărul tuturor neuronilor din rețea.

Acțiunea unui neuron i asupra unui neuron j este expresia faptului că impulsurile care pleacă de la i au modificat starea lui j. Un axon va avea o șansă cu atît mai mare să influențeze un alt neuron, cu cît frecvența impulsurilor sale va fi mai mare. De aceea, se poate spune că starea neuronului j depinde de frecvența medie f a impulsurilor axonale pe care le primește de la neuronul i și de probabilitatea p_{ij}, ca un impuls de la i să influențeze neuronul j.

Se poate deci scrie

$$E_j = F(\bar{f}, p_{ij}),$$

adică starea de excitare E_j a neuronului j depinde de $\bar{f}$ și de p_{ij}.

Dacă se notează prin n_0 numărul total al neuronilor asupra cărora poate acționa axonul neuronului i, se urmărește calcularea numărului n_e de neuroni care sînt influențați (excitați sau inhibați) la momentul t. Interesează deci numărul n_e de neuroni cu care neuronul i stabilește o legătură funcțională activă, care evident este numai o fracțiune din numărul n_0 maxim cu care el poate stabili o legătură.

Variația în timp a stării de excitație sau de inhibiție, produsă de neuronul i asupra mulțimii n_0 de neuroni, se poate calcula cu ajutorul relației

$$\frac{dn_e}{dt} = p_{in}\bar{f}(n_0 - n_e) - kn_e,$$

în care k este o constantă, n_e — numărul neuronilor a căror stare variază în timp, $\overline{f}$ este frecvența medie a impulsurilor emise de axonul neuronului i, iar p_{in} este probabilitatea ca un impuls al neuronului i să influențeze unul dintre neuronii n, spre care se îndreaptă terminațiile sale axonale.

Integrarea ecuației diferențiale de mai sus conduce (după Rashewsky) la rezultatul

$$n_e = \frac{p_{in} \cdot \overline{f} \cdot n_o}{p_{in} \cdot \overline{f} + k} [1 - \exp(-(p_{in}\overline{f} + k)t)],$$

formulă care arată modul cum variază în timp numărul n_e de neuroni influențați de starea neuronului i.

Calcularea variației în timp a stării neuronilor mulțimii n_0 se poate face pornind și de la altă relație. Notînd cu n_e numărul neuronilor asupra cărora se exercită acțiunea excitatorie sau inhibitorie, se poate scrie relația aproximativă (după Rapaport):

$$\frac{dn_e}{dt} = An_e(n_0 - n_e),$$

unde A este un parametru care depinde de frecvența contactelor sinaptice dintre neuronii mulțimii considerate, ca și de probabilitatea ca impulsurile să se propage prin contactele respective.

Această ecuație poate descrie și modul în care se extinde o maladie infecțioasă într-o populație sau modul de propagare a informațiilor într-o colectivitate, ca și alte fenomene.

Distribuția probabilităților realizate în rețele neuronale a fost studiată de diferiți cercetători (Landau, Rapaport, Solomonoff etc.). În toate relațiile care au fost stabilite intervine drept parametru statistic densitatea axonală medie $\overline{a}$.

Mărimea $\overline{a}$ reprezintă densitatea medie axonală care poate fi interpretată și ca densitate axonală a fiecărui nivel axonal în parte. În relațiile date, în loc de constanta $\overline{a}$, se poate lua mărimea $a(t)$, mărime care variază în

Scanned with OKEN Scanner

funcție de nivelul neuronal (sau axonal) t și care exprimă densitatea axonală aparentă proprie fiecărui nivel t; ea este dată de o relație complexă.

Mărimea $a(t)$ exprimă în fond structura morfofuncțională a rețelei neuronale la fiecare nivel axonal. Datele de morfologie arată că relațiile amintite aproximează probabilistic realitatea mult mai bine dacă mărimea $\bar{a}$ nu se consideră constantă, ci depinzînd de nivelul neuronal, deoarece structura rețelelor neuronale nu este uniformă.

■

Trebuie însă subliniat faptul că atît teoria cîmpurilor, cît și teoria stochastică sînt numai aproximări ale fenomenelor reale.

Structura atît de diferențiată a neuronilor, variația conexiunilor sinaptice, unicitatea diferitelor microstructuri ale sistemului nervos nu permit aplicarea la studiul cantitativ al realităților neurologice a metodelor utilizate în teoria cîmpului din fizica teoretică. Tocmai de aceea, metoda cîmpurilor nu este adecvată interpretării realității fiziologice.

Metoda probabilistică se apropie mai bine de realitatea fiziologică, dar nici ea nu ține seama de structura complexă a sistemului nervos. Ea este adecvată numai pentru acele structuri despre care știm anticipat că sînt omogene.

Indirect, se știe însă că metodele probabilistice prezintă interes pentru studiul sistemului nervos — dar în alt sens decît cel abordat de cercetătorii care activează în domeniul neurofiziologiei. Ne referim anume la realizările tehnice gen perceptron, în care intervin fenomene probabilistice și care aproximează bine unele aspecte ale proceselor nervoase superioare, cum ar fi învățarea, recunoașterea formelor etc.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul V

COMANDA ȘI REGLAJUL AUTOMAT ÎN NEUROCIBERNETICĂ

V, *1. Generalități.* Un concept esențial pentru neurocibernetică este acela de sistem automat.

Se numește automat un sistem care asigură un anumit efect în funcție de anumite mărimi fizice sau substanțe chimice care acționează asupra lui. Se disting două clase de sisteme automate: sistemele deschise sau de comandă, sistemele închise sau de reglaj.

Sistemele automate se pot studia recurgîndu-se la scheme-bloc, adică la reprezentări convenționale, în care se indică părțile componente ale obiectului studiat, legăturile dintre aceste părți și mărimile fizice care sînt transmise prin aceste legături.

Semnul convențional grafic utilizat în schemele bloc pentru reprezentarea unui element în general este indicat în figura 5,1.

La o instalație de comandă automată se disting două elemente fundamentale: dispozitivul de automatizare și elementul automatizat.

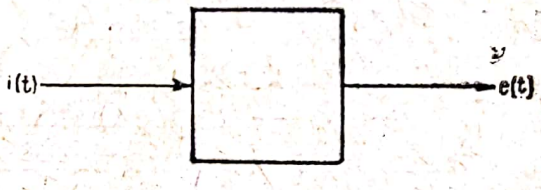


Fig. 5,1. Element dintr-o schemă bloc

i(t) – mărime de intrare; e(t) – mărime de ieșire

Asupra elementului automatizat se exercită acțiunea mărimii de execuție *m*, care provine de la dispozitivul de automatizare; asupra acestuia acționează mărimea de intrare *i*. Elementul automatizat, sub acțiunea indirectă a mărimii de intrare *i*, produce mărimea de ieșire *e*.

Schema-bloc a unei instalații de comandă automată este dată în figura 5,2. Această schemă-bloc poate fi utilizată pentru a exprima, de exemplu, relațiile dintre

Scanned with OKEN Scanner

un motoneuron și fibrele mușchiulare pe care le comandă prin ramificațiile sale axonale: Mărimea i reprezintă excitațiile și inhibițiile pe care le primește motoneuronul; m reprezintă debitul de pachete de molecule de acetilcholină, care se eliberează la nivelul sinapsei neuromușchiu-

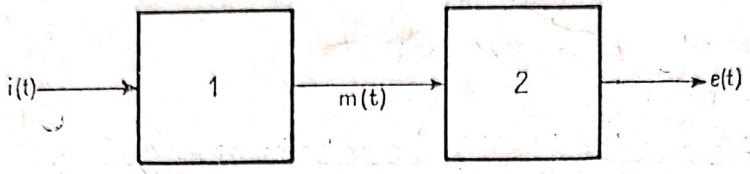


Fig. 5,2. Schema-bloc a unei instalații de comandă automată (legendă în text)

lare; dispozitivul de automatizare este însuși neuronul motor, iar elementul automatizat este reprezentat de fibrele mușchiulare.

Sistemele cu comandă automată sau cu circuit deschis nu permit compararea efectului produs cu comanda inițială. Aceasta constituie un dezavantaj deoarece, datorită perturbațiilor, nu totdeauna mărimea de ieșire are valoarea dorită. Perturbațiile se manifestă atît la intrarea, cît și la ieșirea sistemului, și chiar în interiorul său.

În afară de aceasta, în cazul introducerii unor comenzi variabile în timp, mărimea de ieșire nu ia imediat valoarea dorită, deoarece sistemele prezintă inerție și frecări.

Sistemele de reglaj automat — reprezentate topologic în figura 5,3 — reprezintă o ameliorare, în sensul că apare un transport de informație de la ieșire spre intrare. În nodul 1 se compară efectul produs cu mărimea de intrare.

Toate sistemele automate biologice lucrează pe principiul conexiuni inverse.

O particularitate a sistemelor biologice în general constă în suprapunerea pe un același obiect a mai multor sisteme de reglaj automat.

Sistemele automate, la care mărimea de ieșire $e(t)$ trebuie să varieze în timp, după o lege dată, se numesc automate cu program.

În sistemele reale, mărimea de ieșire nu urmărește variația în timp a mărimii de intrare. Între momentul

t_1 în care apare o variație a mărimii de intrare $u_i(t)$, și momentul t_2, cînd apare variația corespunzătoare a mărimii de ieșire $u_e(t)$, există un decalaj care se numește timpul mort al sistemului. În sistemele liniare, teoretic, nu există timp mort. În sistemele automate liniare din tehnică, cu

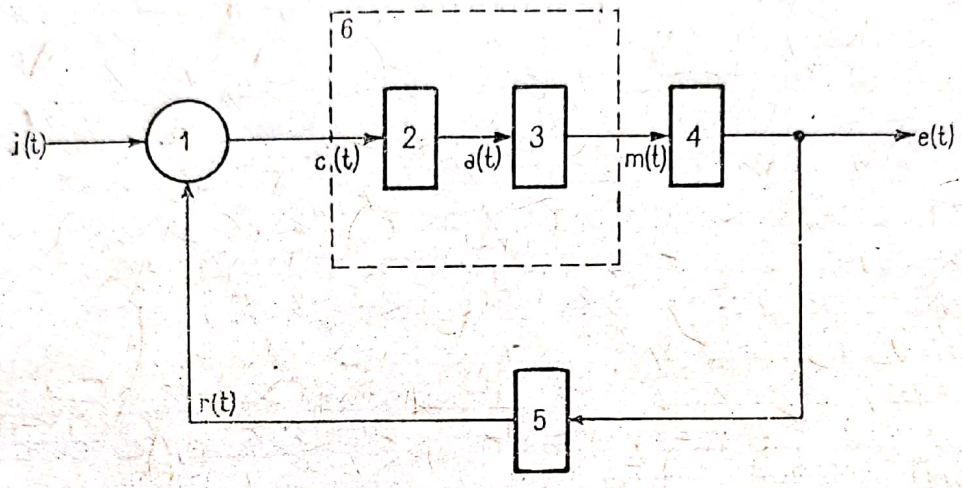


Fig. 5,3. Schema-bloc a unui sistem de reglaj

i — mărime de intrare; e — mărime de ieșire; r — mărime de reacție; c — mărime de acționare; a — mărime de comandă; m — mărime de execuție; 1 — comparator; 2 — regulator; 3 — element de execuție; 4 — element automatizat; 5 — element de măsurare; 6 — dispozitiv automat

constante concentrate, timpul mort este foarte mic. În sistemele neuronale, timpul mort — numit și timp de latență — are un rol important. El are mai multe componente :

— timpul de intrare în funcțiune a sistemului (de exemplu, timpul de reacție a neuronului, timp care depinde atît de parametrii neuronului, cît și de cei ai mărimii excitante) ;

— timpul de propagare a informației prin sistem, de exemplu durata transmiterii informației de-a lungul axonului.

V. 2. *Analiza teoretică a sistemelor automate.* Analiza teoretică a funcționării unui sistem automat se poate face prin mai multe metode.

a. Prima metodă este aceea care pleacă de la schema bloc funcțională, în care diferitele componente sau elemente

sînt reprezentate prin blocuri notate cu simboluri, care ne informează asupra operației pe care o efectuează fiecare bloc, iar blocurile sînt legate simbolic, în funcție de locul pe care-l ocupă în logica funcțională a sistemului. Blocurile pot fi reduse la dimensiunile unui punct, caz în care se obține o organigramă, un graf orientat cu operatori dați pe noduri.

Schema-bloc funcțională face abstracție de structura și caracterul tehnic al diferitelor elemente. În această lucrare se va folosi pe larg metoda blocurilor funcționale.

Schemele-bloc permit, în primul rînd, o analiză calitativă a sistemelor automate. Pentru o înțelerege completă, este însă necesar ca schemele-bloc să fie completate de o analiză cantitativă a fenomenelor.

b. Metoda analizei informaționale implică stabilirea repertoriului de mesaje utilizat de sistem, a structurii statistice a diferitelor mesaje, a raportului dintre mărimea semnalului util și mărimea zgomotului, a gradului de nedeterminare a diferitelor informații (entropia informațională), a capacității informaționale a sistemului, a sistemului de codare și decodare utilizat etc.

c. O altă metodă constă în descrierea matematică a modificărilor succesive pe care le suferă mărimea de intrare $x_i(t)$ pentru a deveni mărimea de ieșire $x_e(t)$.

Pentru fiecare bloc în parte, relația dintre mărimea de intrare x_i și de ieșire x_e se poate scrie sub forma simbolică

$$x_e = T \cdot x_i, \tag{5,1}$$

unde T este un operator. Un operator T se numește liniar dacă subzistă relația $T(x_1 + ax_2) = Tx_1 + aTx_2$, unde a este o constantă. În biologie, sistemele de comandă sînt neliniare și ele pot fi doar aproximate de sistemele liniare.

Neliniaritățile se datoresc prezenței pragurilor, a nivelurilor de saturație, a fenomenelor de *histerezis* și de memorie etc.

În sistemele de reglaj automat, între mărimea de intrare în regulator a și mărimea de comandă c de la ieșirea

din regulator există o relație care, în cazul regulatoarelor liniare, poate fi redată printr-o ecuație diferențială cu coeficienți constanți.

Cazul cel mai simplu este acela al sistemelor proporționale la care subzistă relația

$$c = ka, \tag{5,2}$$

în care k este o mărime constantă, denumită uneori și factor de amplificare. În acest caz, sistemul se numește proporțional (simbol P).

În alte sisteme

$$c = k_d \frac{da}{dt}, \tag{5,3}$$

unde k_d este un coeficient constant. Sistemul se numește diferențial (simbol D).

Dacă subzistă relația

$$c = k_i \int_0^t a \, dt, \tag{5,4}$$

sistemul este integral (simbol I).

În practică, se utilizează adesea sisteme PID, la care între mărimea c de la ieșirea din regulator și mărimea de acționare a subzistă relația

$$c = ka + k_d \frac{da}{dt} + k_i \int_0^t a \, dt. \tag{5,5}$$

Se utilizează de asemenea sisteme mai complicate, la care relația dintre a și c este de tipul

$$c = ka + k_d \frac{d^n a}{dt^n} + k_i \underbrace{\int_0^t \cdots \int_0^t}_{m} a \, dt \tag{5,6}$$

unde m și n sînt întregi ; astfel de sisteme se numesc $PI^m D^n$.

Proprietățile regulatorului se aleg astfel încît în ansamblu sistemul de reglare automată să prezinte o comportare cît mai bună, comportarea fiind evaluată după anumite criterii.

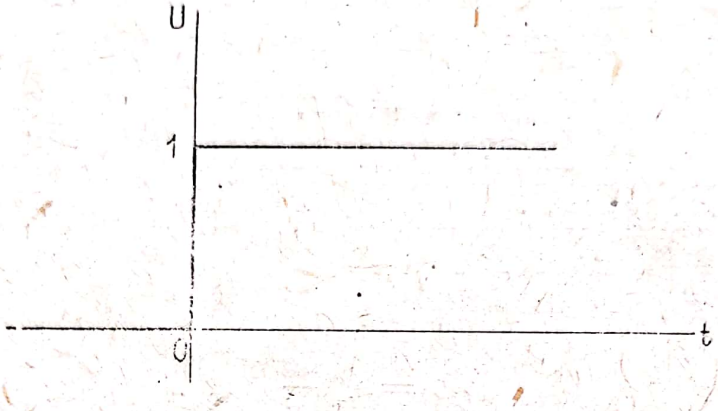


Fig. 5,4. Funcție-treaptă

În unele cazuri, la intrare se aplică o comandă care variază în timp ca o funcție-treaptă (cf. fig. 5,4). Se urmărește ca răspunsul sistemului să fie de același tip (tot

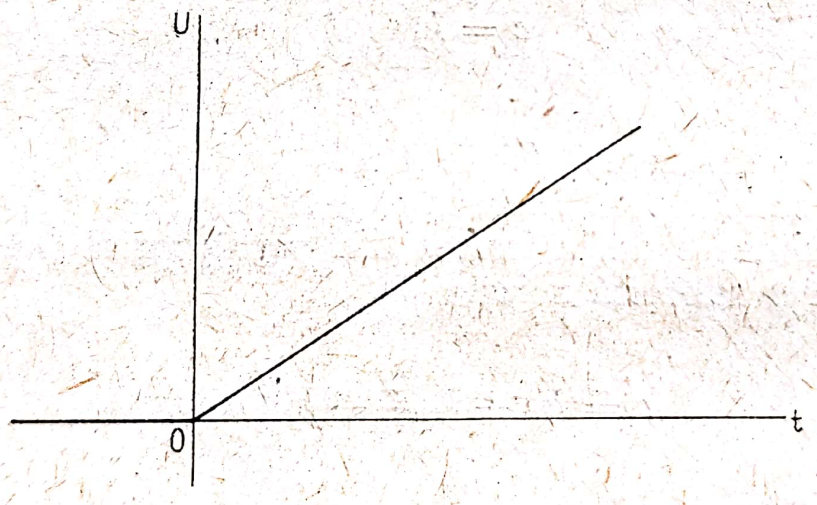


Fig. 5,5. Funcție-rampă

o funcție treaptă) cu un timp de răspuns (latență) minim și cu o suprareglare minimă.

În alte cazuri se aplică la intrare o funcție-rampă, adică o mărime care variază în timp după legea

$$i = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ Kt & t > 0 \end{cases}$$

Și în electrofiziologia sistemului nervos se folosesc metode în care unui neuron sau unui ansamblu de neuroni i se aplică o funcție-treaptă — de exemplu curentul de închidere —, sau o funcție-rampă —, de exemplu un curent cu intensitate crescîndă.

Sistemul de reglaj trebuie să fie astfel structurat încît comportarea lui să satisfacă anumite criterii date, cum ar fi, de exemplu, absența unei erori staționare, prin aceasta înțelegîndu-se calitatea sistemului de a avea un răspuns care, pentru un timp suficient de lung, să fie oricît de aproape de comanda dată.

■

Ecuația care descrie comportarea unui dispozitiv automat se numește ecuație caracteristică. Este un deziderat al neurociberneticii stabilirea ecuațiilor caracteristice ale diferitelor sisteme de comandă din sistemul nervos al organismelor vii.

Din punctul de vedere al comportării, se disting automate cu un număr finit de stări (automate finite), cum sînt releele, în care mărimea de ieșire *are un număr limitat* de valori și poate varia doar discret. Mărimea de ieșire este reprezentată de starea contactului — sau contactelor — acționat de electromagnetul releului. Fiecare contact poate să fie sau închis sau deschis, deci fiecărui contact i se poate atașa o mărime care are una din două valori posibile.

Un timp, s-a crezut — cum am arătat — că și neuronii fac parte din categoria automatelor finite, neuronul fiind sau excitat sau neexcitat. Ulterior, s-a crezut că neuronul are trei stări: excitat, inhibat, repaus. În realitate, însă, neuronul este un automat continuu, mărimea de ieșire putînd lua orice valoare între două limite date, care sînt 0 și valoarea de saturație.

Automatele cu număr infinit de stări se caracterizează prin aceea că mărimea de ieșire variază în mod continuu în funcție de mărimea de intrare — cel puțin între anumite limite.

d. Complexitatea expresiilor cantitative întîlnite în automatică necesită un aparat matematic complex.

Scanned with OKEN Scanner

În tehnică, pentru studierea comportării sistemelor liniare se utilizează aşa-numita transformare Laplace. Prin definiţie, transformata Laplace a unei funcţii $f(t)$ este:

$$F(s) = \int_0^\infty f(t) \exp(-st)\, dt,$$

s fiind un număr complex, $s = \tau + i\omega$.

Avantajul utilizării transformatei Laplace constă în transformarea ecuaţiilor diferenţiale cu coeficienţi constanţi în ecuaţii algebrice.

În acest caz, raportul dintre transformata Laplace $E(s)$ a mărimii de ieşire şi transformata $I(s)$ a mărimii de intrare defineşte funcţia de transfer $Y(s)$ a sistemului

$$Y(s) = \frac{E(s)}{I(s)}. \qquad (5,9)$$

Funcţia de transfer caracterizează sistemul automat la fel de bine ca şi funcţia caracteristică. Funcţia de transfer a permis elaborarea comodă a teoriei automatelor liniare. Ea se utilizează împreună cu funcţia de pondere care, prin definiţie, este transformata Laplace inversă a funcţiei de transfer.

Desigur că, în anumite cazuri, se poate vorbi despre funcţia de transfer sau de pondere a unui sistem biologic, aproximînd acest sistem printr-un sistem liniar. În realitate, însă, prin aceasta se neglijează caracterul neliniar al sistemelor biologice.

V,*3. Mărimi de referinţă.* În general, mărimea de comandă care acţionează la intrarea în sistem poate varia în timp. Atunci cînd mărimea de intrare este constantă, se vorbeşte de o *mărime de referinţă.*

Mărimi de referinţă trebuie să existe şi în sistemele automate neuronale care asigură homeostaza (de exemplu, mărimea de referinţă a glicemiei, a tensiunii arteriale etc.). Se pune întrebarea: cum este realizată biologic mărimea de referinţă? Este sigur că, cel puţin în parte, ea este transmisă genetic. Baza ei morfofuncţională nu este încă

stabilită. Se poate admite că ea este dată de structura spațială a rețelei neuronale și de o anumită distribuție de valori ale diferitelor praguri neuronale. Se realizează o rețea de tipul traductor-intensitate-poziție. În acest sens, s-a dat în figura 4,13 schema unui astfel de traductor.

V, *4. Programe.* În unele cazuri, sîntem interesați de a realiza o anumită succesiune în timp, prestabilită, a valorilor mărimii de ieșire. În aceste cazuri, neglijînd într-o primă aproximație efectul perturbațiilor din sistem, se poate determina succesiunea valorilor pe care trebuie să le ia în timp mărimea de intrare, pentru a obține o anumită succesiune de valori a mărimii de ieșire. Se poate vorbi de o succesiune de mărimi de intrare, care conduce la o succesiune anumită a mărimilor comandate dorite. Valorile și ordinea de succesiune ale diferitelor mărimi de intrare constituie un program.

Programele pot să fie date simbolic fie sub forma unor grafice (organigrame), fie sub forma unui șir de operatori și de condiții logice (algoritm).

În fig. 5,6 se dă un exemplu de organigramă. Asupra mărimii de intrare acționează operatorul care unește punctul de intrare 1 cu primul nod 2. Acest arc este marcat prin operatorul *A*. În nodul 2 intervine condiția logică *P*. În cazul în care ea este satisfăcută, se trece la nodul 3 prin operatorul *B*. În caz contrar, se trece spre nodul 4, pe parcurs intervenind operatorul *C*.

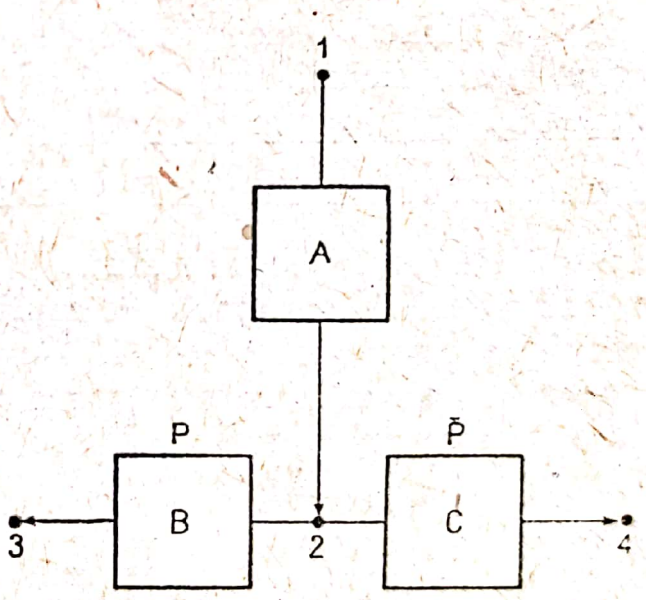


Fig. 5,6. Organigramă (legendă în text)

Modul algoritmic de a reprezenta operatorii și condițiile logice care, în totalitatea lor, constituie un program, este cel indicat în cele ce urmează (Leapunov). Să luăm exem-

plul de mai sus: asupra mărimii de intrare acționează în primul rînd operatorul A, după care se verifică condiția logică P. Aceasta se redă scriind

$$AP.$$

Pentru a exprima faptul că după P, atunci cînd se verifică condiția P, urmează B, se scrie

$$APB.$$

Neverificarea condiției logice conduce la aplicarea operatorului C, ceea ce se exprimă astfel: $AP\uparrow B\downarrow C$. Legătura dintre nodul în care apare condiția logică și succesiunea de operatori care urmează verificării se marchează punînd după condiția logică operatorul sau operatorii la care se referă. O săgeată cu vîrful în sus corespunde neverificării condiției logice. În acest caz, programul se continuă de la săgeata cu vîrful în jos și avînd același număr. Această săgeată indică succesiunea de operatori care urmează în cazul neverificării condiției logice. Săgețile se numerotează în cazul în care în algoritm intervin mai multe condiții logice. De exemplu: $AP_1\overset{1}{\uparrow}CDP_0\overset{2}{\uparrow}\underset{1}{\downarrow}E\underset{2}{\downarrow}!$, în care semnul ! indică sfîrșitul programului.

În tehnică, sistemele ce realizează (concretizează) algoritmii și programele pot fi de tipuri diferite. Procedeele uzuale constau în înregistrarea programului, fie sub forma unor perforații practicate pe o bandă izolantă — de obicei hîrtie sau film cinematografic — fie sub forma unor semnale magnetice înregistrate pe o bandă magnetică. Se utilizează, de asemenea, sisteme optice cum ar fi varierea transparenței unei pelicule cinematografice.

În biologie, se știe că unele programe (ca, de exemplu, cele implicate în biosinteza proteinelor) se află înregistrate în structura macromoleculelor de nucleoproteine.

Din comportamentul ființelor vii rezultă existența a numeroase alte programe. Nu se cunoaște suportul programelor neurofiziologice.

Multe reflexe complexe, formate dintr-o succesiune stereotipă de combinații de contracții mușchiulare și, în

special, comportamentul instinctual, mai ales așa cum se manifestă la insecte, au la bază programe complexe. Modul în care sînt înscrise în memorie diferitele programe este încă total necunoscut. Se poate face ipoteza că o anumită structură topologică a rețelelor neuronale și o anumită distribuție de praguri constituie principiul de bază al codării și înscrierii diferitelor programe, care se realizează în diferitele tipuri biologice de sistem nervos. Este însă posibil ca la acest proces complex să participe și substanțe incluse în corpul neuronului — de exemplu nucleoproteinele.

V,5. *Aferentația inversă.* 1. Atît în automatica modernă, cît și în biologie se utilizează pe larg automatele închise sau sistemele de reglaj, a căror schemă este redată în figura 5,3. Această schemă se caracterizează prin existența comparatorului (1), asupra căruia acționează atît mărimea de intrare $i(t)$ sau $x_i(t)$, cît și mărimea de ieșire $e(t)$ sau $x_e(t)$, care intervine printr-o legătură inversă, numită conexiune inversă, circuit de reacție, *feed-back* sau aferentație inversă. În lungul acestei legături se află uneori intercalat un traductor, numit traductor de reacție (5). Mărimea $r = e$ (sau $x_r = x_e$) care acționează prin circuitul de reacție asupra comparatorului se numește mărime de reacție. Mărimea $c(t) = x_c(t)$ se numește mărime de acționare, și ea este aceea care acționează asupra dispozitivului automat (6).

Pentru a se studia efectul și, mai ales, comportarea căii de legătură inversă, aceasta poate fi izolată, desfăcînd legătura dintre (5) și (1). În cazul sistemelor biologice, adeseori se determină existența căilor de reacție întrerupînd anumite circuite neuronale și observînd modul în care sistemul își schimbă comportarea în urma acestei întreruperi.

Se disting două grupe de sisteme de reglaj: unele în care $x_c(t) = x_i(t) + x_r(t)$, numite sisteme de reglaj cu reacție pozitivă, și altele în care $x_c(t) = x_i(t) - x_r(t)$, numite sisteme de reglaj cu reacție negativă. În general, se admite că sistemul direct de comandă se caracterizează printr-un operator a, iar conexiunea inversă printr-un alt operator

Scanned with OKEN Scanner

β. Modul de funcționare a sistemelor de reglaj este descris de următoarele ecuații:

$$x_c(t) = x_i(t) \frac{a}{1 - a\beta} \text{ pentru sistemele cu reacție pozitivă} \quad (5,10)$$

și

$$x_c(t) = x_i(t) \frac{a}{1 + a\beta} \text{ pentru cele cu reacție negativă.} \quad (5,11)$$

a. Sistemele cu reacție pozitivă funcționează ca sisteme de amplificare. Deoarece mărimea de reacție se adună cu mărimea de intrare, mărimea de acțiune este astfel amplificată.

În aceste sisteme, dacă se realizează condiția $a\beta = 1$, după cum rezultă din relația (5,10), sistemul poate produce la ieșire un semnal în mod independent de existența semnalului de intrare. Aceasta înseamnă că pentru orice semnal de intrare, $x_i(t) \neq 0$, sistemul intră într-o oscilație întreținută.

Un astfel de sistem este reprezentat de ansamblul format de motoneuronii medulari — fibre mușchiulare striate — fusurile neuromușchiulare — aferentația inversă monosinaptică de la fusurile neuromușchiulare la motoneuroni. Acest sistem poate intra într-o oscilație întreținută.

Sistemele de reglare din biologie știm că sînt neliniare. Neliniaritatea sistemelor de reglare pozitive din biologie le conferă acestora și proprietatea de a memora. Caracterul neliniar face să intervină timpul mort sau timpul de latență al sistemului. Datorită acestui fapt, sistemul, o dată declanșat de o mărime de intrare $x_i(t)$, emite o mărime de ieșire $x_e(t)$, care se prelungește printr-un postefect întreținut de circuitul de reacție. Subzistă trei cazuri:

$x_r > x_i$ — în acest caz, postefectul se amplifică pînă la valoarea de saturație a elementelor constitutive. În acest mod, ar putea să funcționeze anumite circuite care stau la baza declanșării unei crize de epilepsie;

$x_r < x_i$ — în acest caz, postefectul scade în timp pînă la anulare sau pînă la nivelul zgomotului. Un model al acestei situații se întîlnește la circuitele reverberante din

structura sistemului nervos care generează un postefect ce se atenuează progresiv;

$x_r = x_i$ — în acest caz, postefectul se prelungește la infinit. Avem un circuit de memorie care funcționează realizînd un operator existențial nelimitat.

Ultimele două tipuri de circuite reprezintă probabil baza memoriei circulante presupusă a exista în sistemul nervos.

b. Sistemele cu reacție negativă funcționează ca niște dispozitive care își corectează eroarea. Componenta directă asigură efectul, componenta de reacție asigură precizia cu care funcționează sistemul. Mărimea $x_c = x_i - x_r$ este proporțională cu eroarea sistemului și tinde spre 0 o dată cu aceasta. După cum rezultă din expresia (5,11), un astfel de sistem nu intră niciodată în oscilație, deoarece expresia $1 + a\beta$ nu se anulează niciodată, oricare ar fi valorile reale și pozitive ale lui a și β.

Aferentația inversă, bisinaptică, de la corpusculii lui Golgi, constituie un exemplu de sistem cu reacție negativă. În aceeași situație intră dispozitivul de reglare a diametrului pupilar, sistemele automate care asigură homeostazia, ca și alte sisteme biologice.

V,6. *Regimuri de funcționare.* În comportarea unui sistem automat distingem un regim forțat, atunci cînd sistemul automat este supus unei mărimi de intrare și cînd mărimea de ieșire depinde numai de această mărime de intrare. Există de asemenea un regim liber, în care sistemul emite o mărime de ieșire, care depinde de diferite forme de energie acumulate în el, de exemplu de inerția elementelor sale. În acest caz, toate mărimile de intrare sînt nule.

1. Atunci cînd mărimea de intrare este staționară, avînd o valoare constantă (sau cu o variație periodică), și acționează un timp suficient de lung asupra sistemului, astfel încît elementele regimului liber să devină neglijabile, se obține un regim forțat staționar, numit regim staționar. O metodă uzuală de realizare a regimului staționar constă în aplicarea unei mărimi de intrare treaptă:

$$x_i(t) = u(t)$$

Scanned with OKEN Scanner

În general, se folosește funcția-treaptă unitară, care se definește astfel:

$$u(t) = 0 \qquad t < 0 \qquad (5,12)$$
$$u(t) = 1 \qquad t > 0.$$

Stabilirea reobazei — a pragului neuronal — constă în obținerea regimului staționar al unui neuron pentru un excitant în treaptă, la care treapta are valoarea pragului.

Un sistem automat, care este capabil să prezinte un regim staționar, se numește *stabil*.

Unele sisteme automate, în regim staționar emit la ieșire o mărime periodică — oscilantă — pentru o mărime de intrare constantă. Este o pseudostabilitate întîlnită frecvent în sistemele biologice.

Există sisteme biologice care la aplicarea unei mărimi de intrare staționară în treaptă răspund printr-o mărime de ieșire care nu mai este controlată de mărimea de intrare (sînt sisteme instabile, și ele sînt importante în fiziopatologie).

Determinarea criteriilor de stabilitate a unui sistem automat este o operație complexă.

Un sistem este stabil dacă

$$\lim_{t \to \infty} x_e(t) = x_{ef}(t) \qquad (5,13)$$

și instabil dacă

$$\lim_{t \to \infty} x_e(t) \neq x_{ef}(t) \qquad (5,14)$$

în care $x_{ef}(t)$ reprezintă componenta forțată a răspunsului sistemului.

Fiziopatologia cunoaște cazuri în care sisteme stabile au devenit instabile sau pseudostabile în urma unor leziuni. Ca exemple se pot cita tremurul parkinsonian, clonusul din sindromul piramidal etc.

Se pot întîlni cazuri în care stadiul staționar prezintă o eroare de poziție staționară față de regimul ideal. De exemplu, se pot cita hipertoniile sau hipotoniile mușchiulare din bolile sistemului nervos.

2. Cînd se trece de la un regim staționar la alt regim staționar, există între ele un regim tranzitoriu. În cursul

Scanned with OKEN Scanner

acestui regim, mărimea de ieşire depinde atît de mărimea de intrare, cît şi de elementele inerţiale ale sistemului, elemente care se manifestă în regimul liber. Regimul tranzitoriu este deci un regim mixt, în care se amestecă componentele de regim forţat şi de regim liber. Importanţa aces-

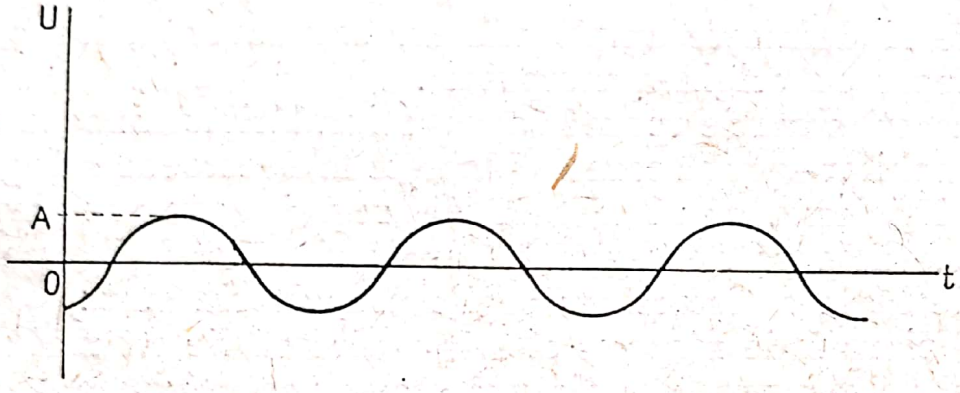


Fig. 5,7. Funcţie sinusoidală

tui regim este foarte mare şi pentru neurocibernetică, deoarece mărimile de intrare care acţionează asupra sistemului nervos au o variaţie aproape continuă, care face ca, de fapt, aproape în permanenţă sistemul nervos să lucreze în regim tranzitoriu.

Studiul experimental al regimului tranzitoriu se face în diverse moduri, după variaţia dată mărimii de intrare. Uzual, se aplică sistemului fie o funcţie-treaptă, fie o rampă unitară (cum se întîlneşte în examenul electric al unui nerv sau muşchi supus unui curent galvanic).

Uneori, se utilizează un impuls unitar exprimat prin funcţia lui Dirac (δ)

$$\begin{aligned} &x_i(t) = u_1(t) \\ &u_1(t) = 0 \text{ pentru } t \neq 0 \\ &u_1(t) \quad \text{nedefinită pentru } t = 0 \text{ cu} \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} u_1(t)\,dt = 1. \end{aligned} \tag{5,15}$$

Studiul analizatorului auditiv se face uneori cu sunete avînd durate foarte scurte (*click*); la fel, activitatea analizatorului vizual se cercetează uneori cu „fulgerări" (*flash*).

În ambele cazuri este vorba de utilizarea unui impuls unitar.

În unele cazuri, obiectului examinat i se aplică o variație sinusoidală

$$x_i(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \qquad (5,16)$$

în care A definește amplitudinea, ω frecvența, iar φ faza (în raport cu originea timpului).

Această situație apare în cazul stimulării luminoase periodice a ochilor — probă care se folosește în electroencefalografie.

3. Eficiența unui sistem de reglaj automat depinde în mare măsură de regimul tranzitoriu. Condițiile pe care trebuie să le satisfacă un regim tranzitoriu sînt:

— timpul de răspuns al sistemului să fie cît mai scurt, timpul de răspuns fiind timpul necesar ca mărimea de ieșire să atingă — cu o diferență de 5% — valoarea sa finală;

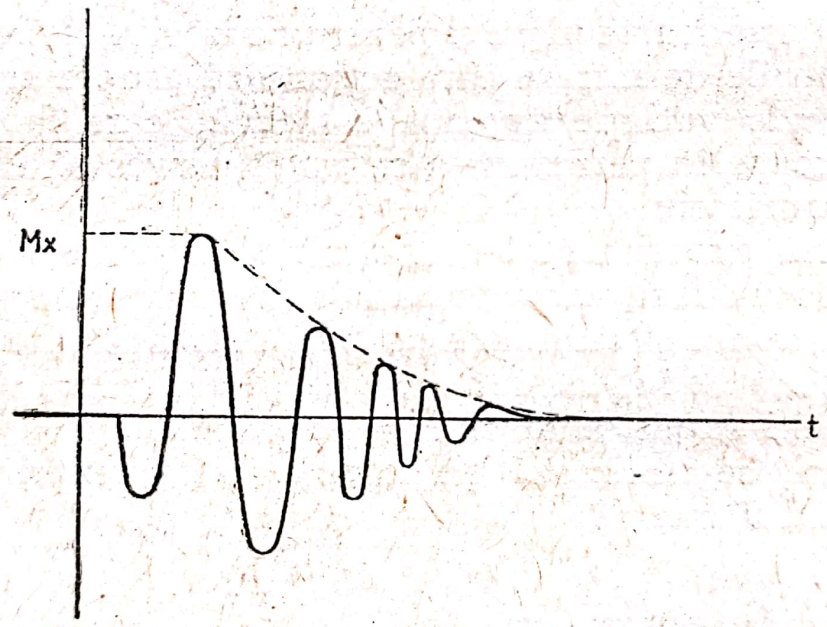


Fig. 5,8. Abatere tranzitorie
Mx — abatere tranzitorie maximală

— sistemul să fie suficient de amortizat, ceea ce înseamnă că, în cazul excitării cu o treaptă unitară sau cu o rampă unitară, abaterea tranzitorie maximă — definită în figura 5,8 — poate să depășească cu un anumit procent mărimea de ieșire în regim staționar;

Scanned with OKEN Scanner

— în cazul sistemelor cu circuit de reacţie, sistemul trebuie să fie stabil în regim tranzitoriu.

Regimul tranzitoriu poate fi periodic sau aperiodic. Oscilaţiile care apar trebuie să fie amortizate ; frecvenţa lor defineşte frecvenţa proprie a sistemului (valoarea ei depinde de structura sistemului).

În cazul probei indice-nas, folosită în clinica bolilor nervoase, se analizează în fond regimul tranzitoriu al sistemului de reglaj al poziţiei membrului superior. În condiţii normale, mişcarea este aperiodică. În caz de leziune a cerebelului, regimul tranzitoriu se modifică. Sistemul nu mai este suficient de rapid (braditelekinezie), devine oscilant (tremurătură intenţională) şi uneori devine instabil (oscilaţiile se amplifică în timp în loc să se amortizeze).

V,7. *Sisteme automate complexe.* Atît în structura sistemului nervos, cît şi în multe instalaţii tehnice nu se întîlnesc sisteme de reglaj avînd schema simplă din figura 5,3.

1. Uneori avem o suprapunere a mai multor sisteme de reglaj, care formează în ansamblu un sistem de reglaj complex. În figura 5,9 sînt redate cîteva scheme de astfel de sistem.

2. Sistemele automate ierarhizate au schema ca cea din figura 5,10.

Instalaţia automată *A* este supusă acţiunii unui dispozitiv *B*, asupra căruia acţionează atît mărimea de intrare, cît şi cea de ieşire. Parametrii caracteristicii şi, eventual, chiar structura blocului *A* se modifică sub acţiunea blocului *B*. Sistemele de acest tip se întîlnesc adesea în structura sistemului nervos.

Sistemele automate ierarhizate pot fi considerate ca sisteme adaptive, deoarece ele îşi modifică funcţionarea pentru a realiza o anumită adaptare la situaţiile întîlnite.

a. Sistemele optimale sînt sistemele care urmăresc realizarea şi menţinerea unui regim staţionar optim. În acest sens, un exemplu biologic îl reprezintă sistemul care asigură menţinerea glicemiei la un nivel constant. Schema unui astfel de sistem poate fi concepută ca cea din figura 5,11.

Scanned with OKEN Scanner

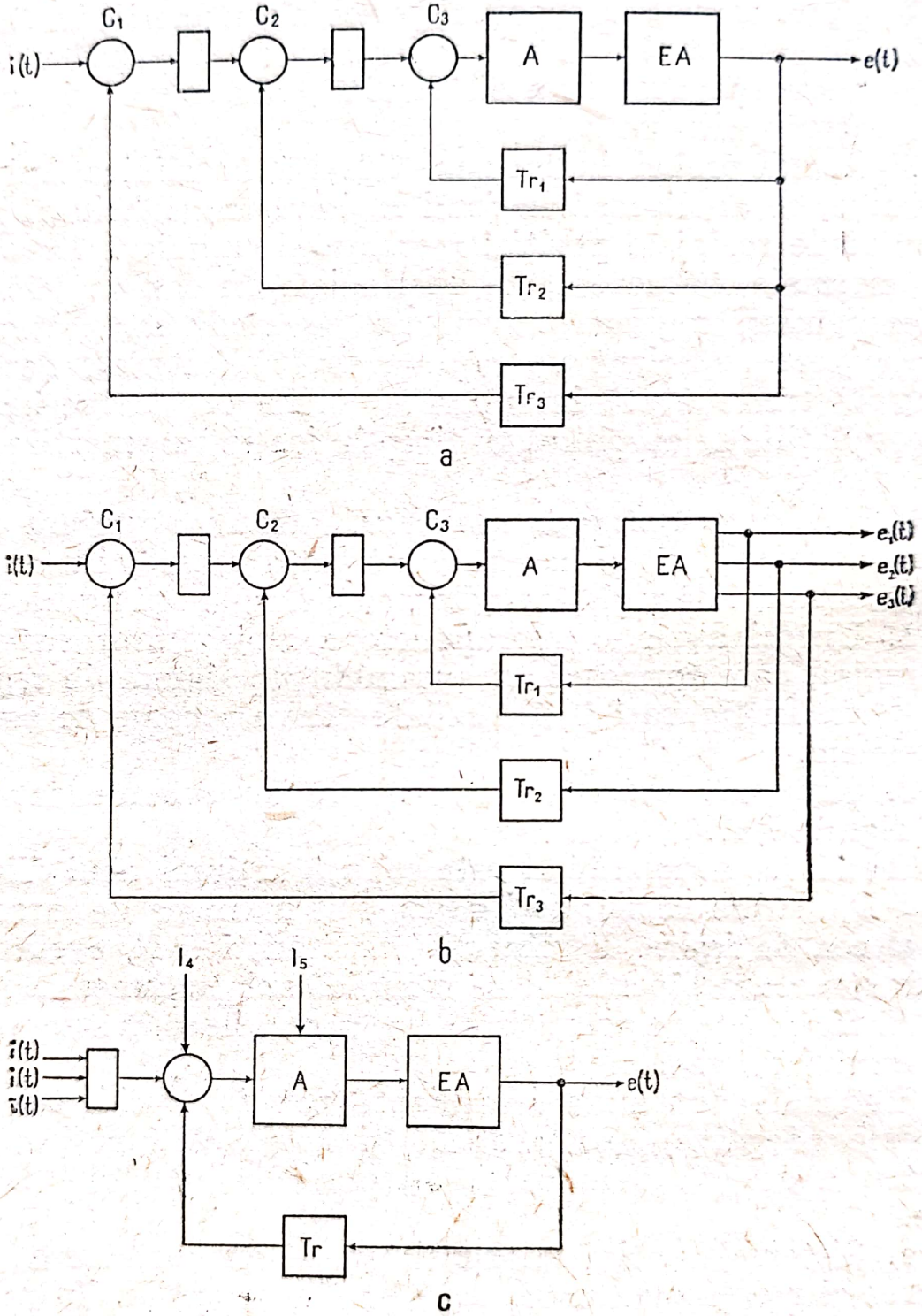


Fig. 5,9. Sisteme de reglaj complexe

$C_{1,2,3}$ – comparatori; **A** – dispozitiv automat; **EA** – element automatizat; $Tr_{1,2,3}$ – traductor de reacție

Scanned with OKEN Scanner

Semnalul de intrare $Ti(t)$ este analizat în M, care emite un semnal indicînd mărimea ideală pe care trebuie s-o aibă mărimea comandată. Semnalele de ieşire sînt şi ele

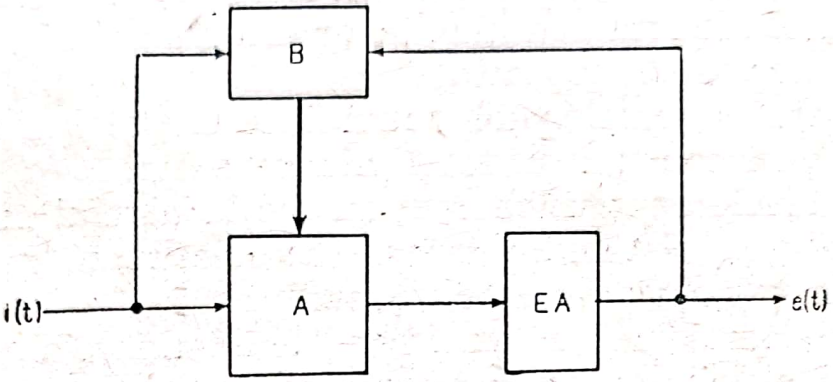


Fig. 5,10. Sistem ierarhizat (legenda în text)

analizate în R, care emite un semnal indicînd mărimea reală a mărimii comandate. În E cele două mărimi sînt comparate, calculîndu-se eroarea mărimii reale faţă de cea

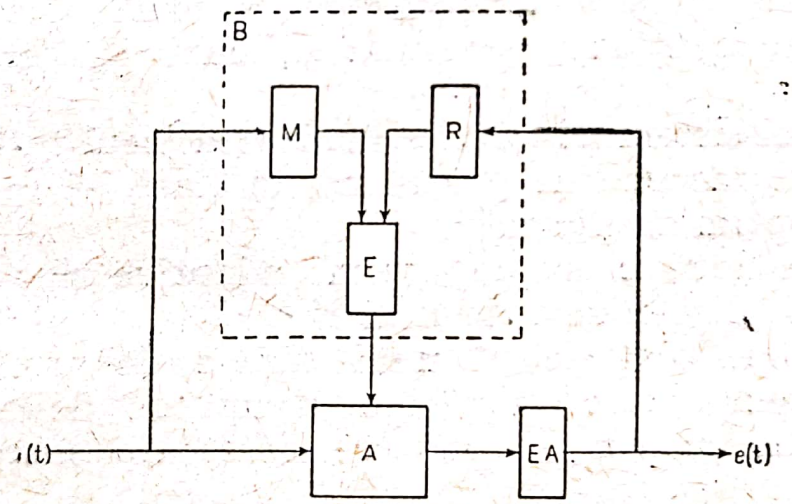


Fig. 5,11. Sistem automat adaptiv optimal (legenda în text)

ideală. În funcţie de mărimea erorii, dispozitivul B modifică parametrii funcţionali ai sistemului A de reglaj.

În realitate, există mai multe sisteme A, deoarece mecanismele prin care acţionează organismul pentru realizarea constantei glicemice sînt multiple.

Pe de o parte, intervin mecanismele de transformare a hexozelor în glicogen și mecanismele de depozitare a glicogenului în ficat și în țesutul mușchiular. Ambele procese sînt reversibile. Alte procese reversibile sînt acelea care conduc la transformarea glucidelor din sînge în lipide care, la rîndul lor, sînt depozitate.

În afara proceselor de acumulare a glucidelor există și procese de consum și de eliminare a lor.

Fenomenele energetice care au loc la nivelul mușchilor, ca și la nivelul sistemului nervos se efectuează cu consum de glucide, proces care este ireversibil.

Există, de asemenea, un proces de eliminare a glucidelor la nivelul rinichilor, proces care se produce numai atunci cînd glicemia depășește un anumit prag.

Pentru menținerea glicemiei la un nivel constant intervin și alte două mecanisme. Atunci cînd glicemia scade sub o anumită limită, apare senzația de foame, care traduce pe plan subiectiv necesitatea de ingurgitare a unor zaharuri. Atunci cînd aportul de glucide este ridicat, se produce o reacție de vomă, care elimină din stomac conținutul acestuia și, implicit, surplusul de glucide.

Întregul sistem adaptiv armonizează jocul tuturor acestor diferite mecanisme pentru ca, în final, să se realizeze un nivel optim al glicemiei.

b. O a doua clasă de sisteme adaptive sînt sistemele de control și sistemele de urmărire.

Exemplul biologic al unui sistem de urmărire constă în comandarea mișcărilor complexe. Schema generală a unui sistem adaptiv de acest tip se redă în figura 5,12.

Sistemele biologice de urmărire sînt proiectate astfel încît mărimea de ieșire să realizeze o anumită performanță, să verifice un anumit criteriu.

În cazul simplu al urmăririi unui contur, în realitate sistemul nu urmărește curba plană ideală y, ci curba reală w. Sistemul va funcționa optim atunci cînd reușește să urmărească conturul dat cu viteză maximă și cu o eroare minimă. În adevăr, sistemele reale nu pot urmări exact curba dată,

Scanned with OKEN Scanner

între y și w aparînd o anumită diferență. Eroarea sistemului se poate evalua, de exemplu, cu formula

$$\int_{x^0}^{x^1} |y - w| dx = 0.$$

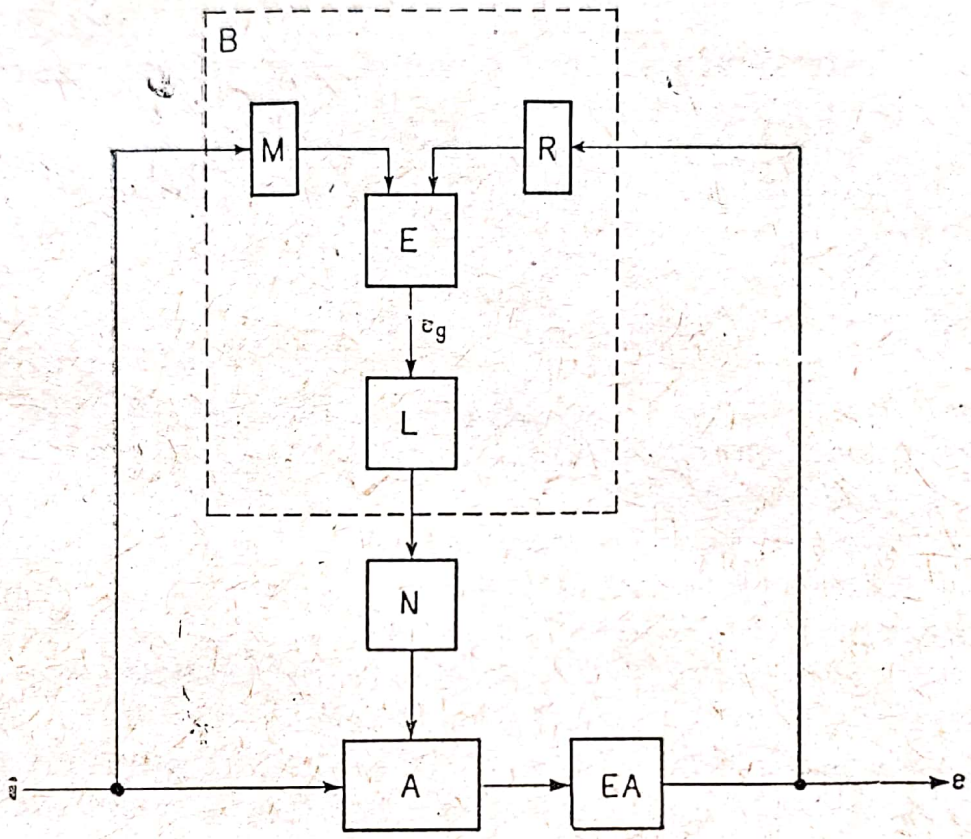


Fig. 5,12. Sistem automat de urmărire

M – analiza mărimii ideale; **R** – analiza mărimii reale; **E** – calcularea mărimii eroarei; **L** – medierea variațiilor mărimii de eroare; **N** – codarea acestei medii într-o mărime neliniară ce acționează asupra dispozitivului automat; **A** – dispozitiv automat; **EA** – element automatizat

Întreaga motilitate a organismului este comandată de sistemul nervos, potrivit principiului de mai sus, pentru asigurarea unui regim optim.

c. Dispozitivul B poate include un întreg calculator. În acest caz, ne găsim în fața unui sistem adaptiv cu calculator. Este foarte probabil ca majoritatea sistemelor

adaptive din organism să includă calculatoare analogice realizate cu rețele neuronale.

Dispozitivul *B* poate include un sistem de memorie: în acest caz, ne aflăm în fața unui sistem adaptiv instruibil.

Deoarece în biologie orice sistem adaptiv implică o rețea neuronală, trebuie luată în considerare plasticitatea acestora, deci posibilitatea sistemului de a învăța. Instruibilitatea este o proprietate generală a rețelelor neuronale.

În linii mari, putem spune că întreaga neurocibernetică are drept scop final studierea sistemelor adaptive din structura sistemului nervos uman.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul VI

RECEPȚIA

VI,*1*. *Generalități*. Sistemul nervos este un agregat de celule nervoase, fiecare neuron comportîndu-se ca un calculator analogic. Sistemul nervos este o rețea care are o serie de intrări prin care îi sosesc informații și o serie de ieșiri prin care emite informații. În capitolul de față se vor studia intrările sistemului nervos, intrări reprezentate prin receptori.

În condiții normale, informațiile pătrund în rețeaua nervoasă prin receptorii care funcționează ca niște traductori. Amintim că unii neuroni din centrul respirator, din hipotalamus etc. pot fi excitați direct prin acțiunea unor substanțe chimice din mediul circulant perineuronal; este o altă formă de intrare a informației în rețeaua neuronală, neuronii respectivi funcționînd ca traductori.

Prin intermediul receptorilor, anumite mărimi din mediul extern sau intern al ființelor vii acționează asupra sistemului nervos al acestora determinînd fenomenele care definesc activitatea lui informațională.

În fiziologie, se numește excitant mărimea fizico-chimică aptă să provoace, prin intermediul receptorilor, un fenomen informațional în sistemul nervos. Așadar, excitanții sînt izvoarele de informație ale sistemului nervos.

Un excitant este caracterizat prin următoarele patru atribute: calitate, intensitate, desfășurare în timp (protensitate), aspect spațial (extensitate).

Problema neurocibernetică a recepției constă în a stabili modul în care receptorii codează aceste patru atribute ale excitanților.

VI,*2*. *Schema unui receptor*. În general, receptorii sînt grupați în organizații morfofuncționale mai complexe —

Scanned with OKEN Scanner

organele de simț. Indiferent de organul în care sînt încadrați, receptorii au o schemă ca aceea reprezentată în figura 6,1.

Excitantul acționează asupra unei structuri aneurale, de exemplu un corpuscul tactil, conul sau bastonașul unei celule vizuale. Din interacțiunea excitantului cu porțiunea aneurală a receptorului se produc în această porțiune o serie de fenomene energetice, care se pot exterioriza prin manifestări biochimice, termice și mai ales electrice — așa-numitul potențial receptor. Porțiunea aneurală își exercită acțiunea ei asupra porțiunii neurale a receptorului, mai exact asupra terminației amielinice a neuronului receptor de ordinul I. În unele cazuri, se poate presupune o acțiune directă a porțiunii aneurale asupra porțiunii neurale — ca în cazul mecanoreceptorilor; în alte situații, aceasta se exercită prin intermediul potențialului receptor.

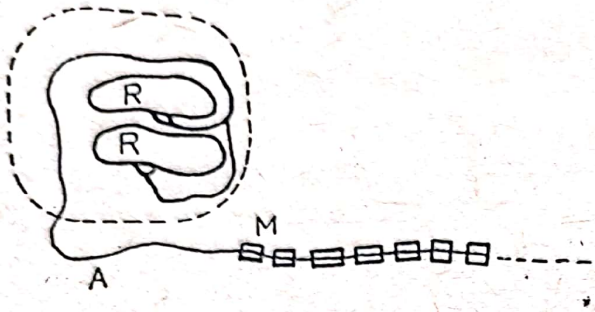


Fig. 6,1. Schema unui receptor din piele

R – porțiune aneurală a receptorului; A – porțiunea amielinică a fibrei receptoare; M – porțiunea mielinică a fibrei receptoare

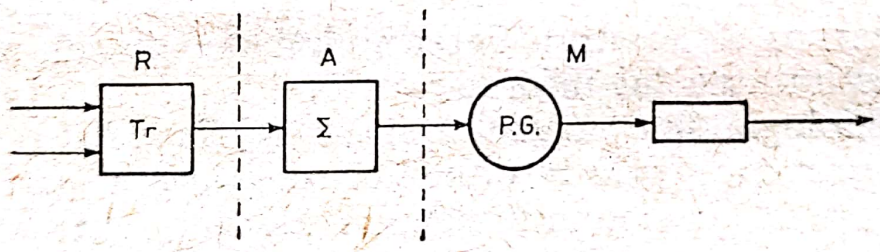


Fig. 6,2. Schema logică a unui receptor

R – receptor aneural (Se comportă ca un traductor); A – fibră amielinică (Se comportă ca un sumator); M – fibră mielinică (Se comportă ca un generator de impulsuri cu prag și ca un canal de transmisiune)

Porțiunea amielinică a neuronului receptor se comportă ca membrana somatodendritică a unui neuron de tip Golgi I. La nivelul ei apare un potențial de acțiune gradat — potențialul generator al lui Davis. Suprafața de sumație fiind

mică, iar necesitățile de memorare aproape nule, polul receptor al neuronului este organizat foarte simplu.

Porțiunea amielinică acționează asupra porțiunii mielinice care se comportă ca un axon, a cărui origine este, prin definiție, locul de întîlnire a celor două porțiuni; aici se generează potențiale de acțiune modulate în frecvență.

În figura 6,2 se dă schema logică a unui receptor care funcționează pe principiile descrise anterior.

VI,3. *Codarea calității*. Calitatea excitanților poate fi de mai multe tipuri. Identificarea acestor tipuri de excitanți depinde de structura porțiunii aneurale a receptorului.

a. Excitanții mecanici sînt identificați de mecanoreceptori a căror porțiune aneurală prezintă o astfel de structură microscopică, încît acțiunile mecanice orientate în anumite direcții acționează asupra membranei porțiunii neurale, generînd activitatea electrică a acesteia. În funcție de structura porțiunii aneurale, semnalele sînt declanșate prin presiuni (la preso sau baroreceptori), atingeri (la tangoreceptori), tracțiuni, deformări, torsiuni. Acești receptori se află în piele, mucoase, articulații și mușchi, în vase și unele viscere. Forme mai specializate de mecanoreceptori sînt fusurile neuromușchiulare, receptorii din labirint și receptorii auditivi. Mecanoreceptorii din analizatorul auditiv semnalizează deformări a căror amplitudine este mai mică chiar decît diametrul atomului de hidrogen.

b. Excitanții chimici acționează asupra stării staționare biochimice a porțiunii aneurale a chemoreceptorilor. În funcție de structura chimică a substanței excitante și de concentrația ei, în imediata vecinătate a receptorului acesta își modifică dinamica energetică și influențează membrana porțiunii neurale. În cazul receptorilor gustativi, M. B. Lloyd a arătat că moleculele sau ionii se fixează la suprafața celulei gustative într-un strat monomolecular. Dacă se notează cu N numărul maxim de molecule care se pot fixa pe celula gustativă și cu R_M răspunsul maximal al acesteia, atunci subzistă relația

$$\frac{C}{R} = \frac{C}{R_m} + \frac{1}{K \cdot R_m} \qquad (6,1)$$

Scanned with OKEN Scanner

în care C este concentrația substanței excitante, iar K este o constantă de disociere definită de relația

$$K = \frac{(Z)}{C\,(N - Z)} \qquad (6,2)$$

unde Z este numărul de molecule fixate.

Zottermann a identificat receptori specializați pentru diferite substanțe sapide la diferite animale. Specificitatea acestor organe, pentru moleculele excitante, este determinată de structura membranei celulelor gustative.

Problema receptorilor olfactivi nu a fost încă rezolvată cantitativ.

De asemenea, nici specificitatea diferiților receptori olfactivi pentru diferite substanțe nu a fost încă obiectivată cu certitudine cu metodele electrofiziologice, fiind atestată numai de metodele fiziologice și de metoda reflexelor condiționate.

Sensibilitatea chemoreceptorilor este de ordin molecular ; de exemplu, la om receptorii olfactivi pot semnaliza prezența în fosele nazale a unei cantități de 1/460 000 000 mg de mercaptan.

c. Radiațiile electromagnetice din anumite domenii de frecvență acționează, și ele, asupra unor receptori.

Radiațiile luminoase acționează asupra fotoreceptorilor a căror porțiune aneurală include o substanță fotoreceptoare, un pigment. Energia luminoasă acționează asupra pigmentului, determinînd fenomenul de fotoliză, care amorsează o serie de fenomene energetice încă incomplet cunoscute și care în final duc la depolarizarea membranei porțiunii neurale a fotoreceptorului respectiv. Atunci cînd acțiunea fotonilor a încetat, pigmentul se resintetizează, receptorul redevenind apt să răspundă la o nouă excitare luminoasă.

Pigmentul este constituit dintr-un complex proteic incolor — opsina — și un grup cromofor — retinina. Retinina este aldehida vitaminei A, care există în două variante, ceea ce conduce la două variante de retinină (retinina 1 și retinina 2). Radiațiile luminoase modifică izomeria retininei, amorsînd astfel procesul de fotoliză. În biologie se cunosc

Scanned with OKEN Scanner

patru variante principale de pigmenți și anume : rodopsina, iodopsina, porfiropsina și cianopsina. Primele două provin din retinina 1, iar ultimele două din retinina 2. Cele patru variante provin prin adăugarea la cele două tipuri de retinină fie a scotopsinei, fie a fotopsinei.

În general, fiecare specie animală are un singur tip de retinină, astfel încît există sisteme rodopsină-iodopsină și sisteme porfiropsină-cianopsină.

Pigmentul este dispus pe retina vertebratelor în elemente microscopice speciale, denumite bastonașe și conuri. În bastonașe există un dispozitiv de captare, format din suprapunerea a circa 700 discuri de lipoproteine, care mărește probabilitatea de acțiune a unui foton asupra pigmentului. Aceasta explică faptul că bastonașele pot emite semnale chiar pentru excitări luminoase de ordinul a cîtorva cuante.

Rodopsina conferă bastonașelor proprietatea de a semnaliza prezența radiațiilor electromagnetice în domeniul lungimilor de undă 390 Å — 770 Å, indiferent care. Aceste elemente, codînd numai intensitatea energiei luminoase absorbite (vederea scotoptică), permit vederea acromatică.

Conurile funcționează cu un prag mai ridicat și dau o informație suplimentară, indicînd lungimea de undă a radiației excitante, ceea ce implică minimum două variante de iodopsină cu spectre diferite de absorbție. Conurile produc vederea fotoptică.

După Hartridge, la vertebrate s-ar găsi trei grupe de variante de analiză cromatică :

1) grupa tricoloră : portocaliu (600 Å), verde (457 Å) și albastru-violet (450 Å) ;

2) grupa galben-albastru : galben (578 Å) și albastru (476 Å) ;

3) grupa roșu (660 Å) și albastru-verde (500 Å).

În modul acesta, analiza cromatică este efectuată într-o primă etapă chiar în receptorii care acționează ca filtre de frecvență, datorită spectrelor de absorbție diferite ale opsinelor.

Analiza cromatică mai poate fi efectuată în fotoreceptori și pe baza unui principiu diferit, conurile fiind acope-

Scanned with OKEN Scanner

rite cu substanțe care au proprietăți de filtrare diferite. Acest caz se întîlnește la păsări și la reptile.

Fibrele aferente care pleacă de la un anumit cromoreceptor semnalizează culoarea excitantă, adică lungimea de undă a radiației luminoase detectată de receptorul respectiv. Sîntem deci în prezența unui principiu de codare spațială.

Unii autori (Donner) au admis și o codare temporală. Frecvența maximă a semnalelor pe axon apare după o perioadă oarecare D de la începutul semnalizării, D fiind funcție de lungimea de undă a radiației excitante.

d. Radiațiile electromagnetice din domeniul infraroșu acționează asupra termoreceptorilor care semnalizează, în principal, modificările regimului caloric. Unii semnalizează creșterile, iar alții scăderile de temperatură, fiind deci receptori pentru cald, respectiv pentru rece. Acești termoreceptori sînt reprezentați de corpusculii lui Ruffini (pentru cald) și de cei ai lui Krause (pentru rece). Ei sînt distribuiți în piele și mucoasele zonelor de intrare și ieșire din sistemele cavitare (mucoasele bucală, nazală, rectală etc.).

Termoreceptorii au un regim staționar pentru fiecare nivel termic. Regimul tranzitoriu dintre stadiile staționare acționează asupra porțiunii neurale. După O. Connor, acționarea s-ar face prin modificări survenite — în cursul variațiilor termice — în filmele monomoleculare de acizi grași care se găsesc la nivelul termoreceptorilor. Sensibilitatea termoreceptorilor este ridicată la om, pragul variind între 0,2°C și 1,2°C. Unele vertebrate poikiloterme (de exemplu șerpii-cu-clopoței) pot sesiza variații de temperatură de 0,001°C.

e. La unele specii de pești (gimnotidele, gimnarehidele și mormiridele) există electroreceptori care semnalizează variațiile de cîmp electric din jurul animalului. La unele specii, pragul este foarte coborît.

VI,*4. Codarea intensității.* a. Intensitatea excitației este tradusă de receptor, indiferent de tipul considerat, sub forma amplitudinii gradate a potențialului generator, adică a echivalentului potențialului de acțiune gradat al

membranei somatodendritice a neuronilor centrali. Între amplitudinea potențialului de acțiune al membranei somatodendritice și mărimea excitantului am văzut că subzistă o relație logaritmică. Și la nivelul receptorilor s-a stabilit o relație logaritmică între mărimea excitantă și amplitudinea potențialului generator (Rushton), care determină apariția impulsurilor modulate în frecvență.

Adrian a arătat că între mărimea excitantului, aplicat pe receptor, și perioada impulsurilor există o relație de tip logaritmic. Se poate scrie

$$f = k \log I, \tag{6,3}$$

în care f reprezintă frecvența impulsurilor axonale;

I — intensitatea stimulului;

k — o constantă de proporționalitate.

Această relație aproximează destul de bine situația întîlnită în cazul stimulilor de intensitate medie.

b. Cuplul receptor-neuron receptor se bucură de proprietatea de adaptare. Pentru un I constant (deci reprezentat de o funcție-treaptă) f nu este constantă. Valoarea lui f scade în timp pînă la o valoare staționară f', scăderea făcîndu-se după o curbă exponențială (cf. figura 6,3 b).

Se poate scrie

$$f = (1 - \exp t/\tau)k \log I + f',$$

în care t reprezintă timpul, iar τ este constanta de timp a fenomenului de adaptare.

Unii receptori se adaptează foarte lent, de exemplu proprioceptorii mioartrocinetici, iar alții se adaptează foarte rapid, de exemplu tangoreceptorii cutanați. Mărimea lui τ corespunde necesităților informaționale ale sistemului. În cazul proprioceptorilor mioartrocinetici este necesar ca sistemul nervos să fie informat asupra stărilor diferitelor componente ale aparatului locomotor, chiar și atunci cînd acesta este staționar. În cazul tangoreceptorilor, aceștia trebuie să informeze sistemul nervos în special atunci cînd survine ceva nou.

La unii receptori, prin adaptare se revine la nivelul de zero al sistemului, deci $f' = 0$ (cf. figura 6,3 *a*).

Scanned with OKEN Scanner

După acest principiu funcționează fotoreceptorii de Limulus.

La alți receptori, f' depinde de mărimea I a excitantului.

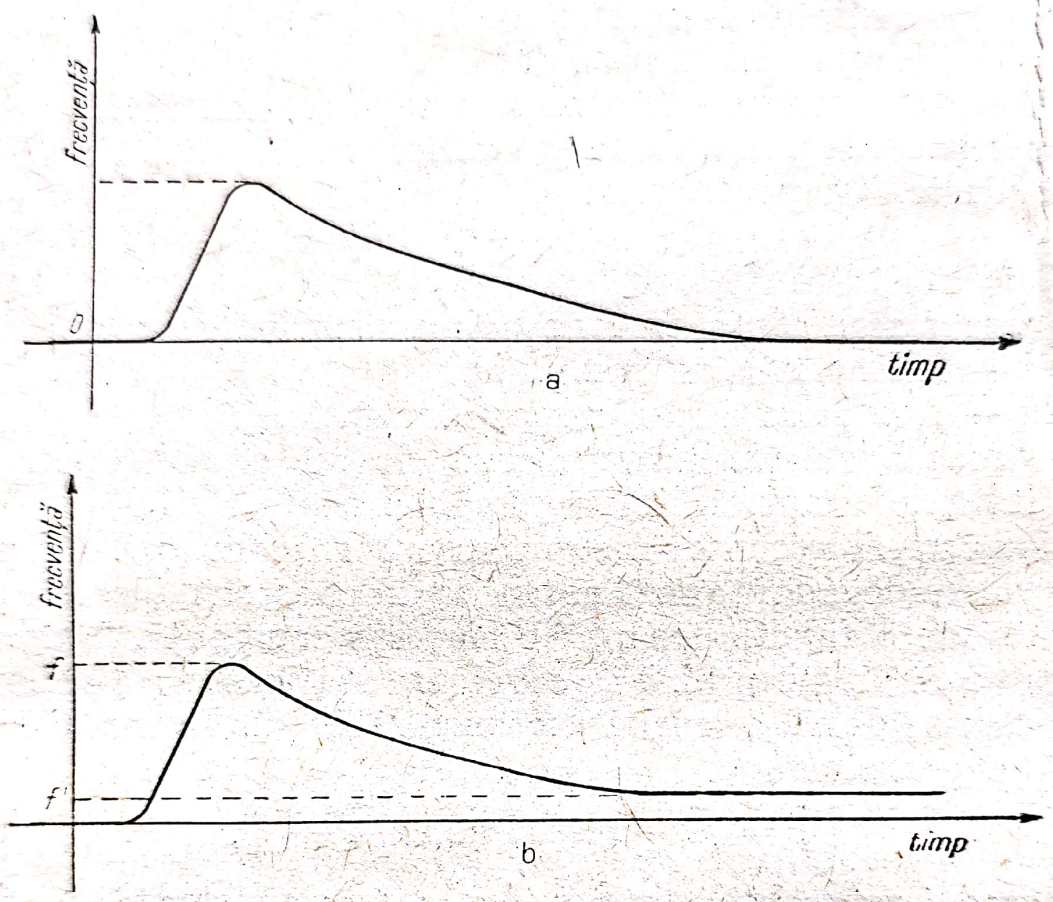


Fig. 6,3. Adaptarea

Cercetările lui Keidel și Keidel au arătat că trecerea de la frecvența f la frecvența f' în cursul procesului de adaptare nu reprezintă o pierdere de informație. Cercetările lor asupra adaptării în cazul vederii, auzului și somesteziei au arătat că, dacă unui receptor i se aplică doi excitanți în treaptă, de intensități diferite, și dacă ΔI reprezintă diferența dintre cele două excitații, iar Δf și $\Delta f'$ diferențele respective ale frecvențelor de răspuns, atunci

$$\Delta f' > \Delta f, \tag{6,5}$$

subzistînd evident și relațiile (6,3) și (6,4).

Adaptarea este o modificare activă a reactivității receptorului, determinată de excitantul însuși.

Deci, aplicarea unui excitant modifică reactivitatea receptorului. S-a constatat că această modificare se face prin două clase de factori, dintre care unii sînt pozitivi iar alții negativi.

Factorii pozitivi determină o creștere a reactivității receptorului. Ei se manifestă în cazul timpului util și al timpului minim de aplicare a unui excitant, micșorînd acești parametri.

Factori temporari negativi determină o scădere a reactivității, intervenind în fenomenul de adaptare. Unii autori au admis existența unui fenomen similar adaptării receptorilor și care se petrece la nivel neuronal: este vorba de *acomodare*.

Adaptarea nu trebuie confundată cu aclimatizarea, care este o scădere a reactivității receptorilor, determinată de alți excitanți de același tip aplicați anterior sau simultan aceluiași receptor sau grup de receptori. *Aclimatizarea* a fost studiată în special la termoreceptori.

Adaptarea nu trebuie confundată nici cu *oboseala*, care este un fenomen pasiv, datorat epuizării rezervelor energetice ale receptorului.

c. Unele cupluri receptor-neuron receptor prezintă în lungul axonului în repaus potențiale de acțiune avînd o valoare f_0, care definește nivelul de zero al cuplului — de exemplu la receptorul vestibular.

La aceste cupluri, pentru anumite subsituații, frecvența impulsurilor axonale crește, iar pentru altele scade. De exemplu, în cazul receptorului vestibular, devierile ampulopete ale cupulei reduc frecvența descărcărilor, în timp ce devierile ampulofugale produc o creștere a frecvenței. Astfel de receptori codează într-un cod temporal atît calitatea excitantului, cît și intensitatea acestuia, care este redată prin mărimea variației de frecvență.

d. În unele cazuri, intensitatea excitantului este codată și spațial, ca în cazul presoreceptorilor cutanați, unde numărul receptorilor excitați crește o dată cu creșterea intensității excitantului.

Scanned with OKEN Scanner

În alte cazuri, există și receptori cu praguri diferite. Excitarea în funcție de intensitatea stimulului va determina un răspuns în receptori, potrivit cu pragurile acestora, realizînduse printr-un proces de recrutare o spațializare a codării intensității. Acest principiu a fost demonstrat la receptorii acustici pentru ultrasunete ai fluturilor de noapte (Roeder și Treat) și pare a fi un principiu general pentru organele receptorii acustice (H. David). În aceste cazuri, receptorii se comportă nu numai ca un traductor de intrare, ci și ca un traductor intensitate-număr.

VI, *5. Codarea desfășurării temporale.* a. O primă modalitate de codare a desfășurării temporale a unui excitant este reprezentată de faptul că neuronul receptor descarcă (semnalizează) în tot timpul duratei excitației (cf. fig. 6,4 *a*). Dacă se aplică un excitant în treaptă în intervalul $t_1 - t_2$, atunci se obține un răspuns în intervalul de timp $t'_1 - t'_2$, sensibil egal cu precedentul.

Trebuie remarcat că $t'_1 > t_1$ și $t'_2 > t_2$, deoarece intervine timpul de latență η al sistemului.

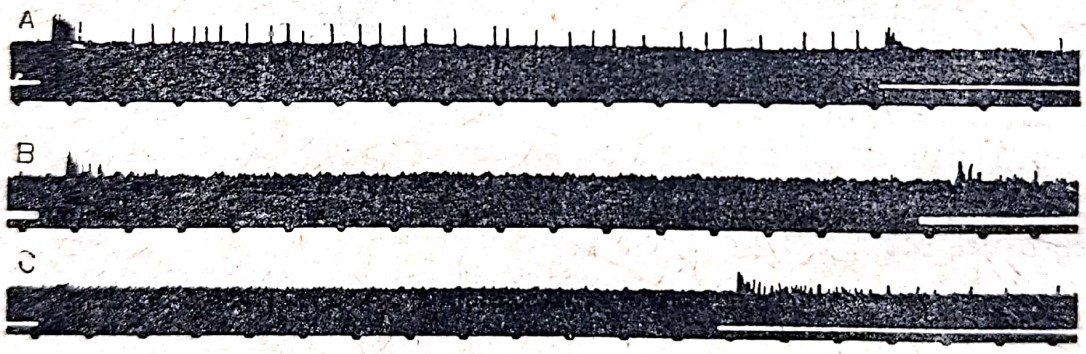


Fig. 6,4. Răspunsuri neuronale la stimularea luminoasă a fotoreceptorilor de Limulus
A – Răspuns ON; B – Răspuns ON–OFF; C – Răspuns OFF (după Hartline)

b. O altă modalitate a codării desfășurării temporale a unui mesaj este realizată prin faptul că există, după cum am văzut, tipuri particulare de receptori, care semnalizează începutul (ON), sfîrșitul (OFF) sau începutul și sfîrșitul (ON—OFF) unei excitații, deci în general variația

Scanned with OKEN Scanner

intensității stimulului. Se realizează deci ceva analog cu modularea Δ.

Această modulare Δ este necesară, deoarece sfîrșitul evenimentelor electrochimice declanșate de un stimul nu este totdeauna precizat. În adevăr, $t'_2 > t_2$, dar diferența $t'_2 - t_2$ depășește de cele mai multe ori valoarea timpului de latență $\eta = t'_1 - t_1$. Valoarea, în general variabilă, cu care $t'_2 - t_2$ depășește pe η se numește *postefect*. Acesta reprezintă o formă de memorie și se datorește faptului că procesul declanșat de excitant se menține pe canalele sistemului nervos central, fiind întreținut, de cele mai multe ori, de circuitele reverberante (sau alte tipuri de rețele de memorizare).

c. În analiza codării desfășurării temporale a excitantului trebuie luat în considerare faptul că există o *cuantificare a timpului*. Timpul minim de excitare necesar pentru a determina un răspuns în fibra aferentă pentru excitantul de intensitate minimă (prag) se numește *timp util* (Gildmaster). Timpul minim necesar scade atunci cînd intensitatea excitantului crește peste valoarea prag. Aceasta se datorează, după cum am amintit, intervenției unor factori temporali pozitivi.

Un alt element de luat în considerare este faptul că pe canalele aferente, și probabil pe unele canale centrale ale sistemului nervos, se efectuează operații de autocorelare (cf. fig. 4,11). Aceasta implică intervenția unui timp de întîrziere și mai ales a unui intervalul de timp în lungul căruia se face autocorelația. Deci și datorită acestui fapt se vede că timpul de excitare nu poate scădea sub o valoare minimă, aceea a intervalului minim necesar pentru calcularea funcției de autocorelație. Aceeași concluzie o impune și faptul că în unele rețele neuronale se calculează o funcție de heterocorelație între două mesaje aferente diferite.

În fine, mesajele aferente nu au totdeauna un aspect simplu, deoarece semnalul de intrare (excitantul) nu variază în mod real ca o funcție-treaptă sau ceva asemănător. Apare în felul acesta o variație în timp a frecvenței care realizează o adevărată structură temporală (un *pattern*). Intervenția sistemelor de recunoaștere necesită ca analiza dis-

Scanned with OKEN Scanner

tribuirii frecvențelor (care definesc structura respectivă) să se facă pe anumite intervale de timp care nu pot scădea sub o anumită valoare minimă. Aceasta adaugă un alt element care impune cuantizarea timpului.

Cuantizarea timpului este un fapt pe care psihologii și neurofiziologii îl cunosc. Amintim că cinematografia și televiziunea sînt posibile tocmai datorită acestei cuantizări.

VI, 6. *Codarea distribuției spațiale.* În cazul analizatorului vizual sau cutanat, codarea distribuției spațiale (sau a poziției spațiale) a excitanților se face tot spațial. Există la diferitele niveluri ale analizatorilor, dar mai ales în extremitatea corticală a acestora, o reprezentare topologică a diferitelor regiuni ale retinei sau ale pielii și mucoaselor.

Vom vedea, în cursul acestei lucrări, principiul după care se face această reprezentare.

În cazul analizatorului auditiv, poziția spațială a unui excitant sonor este codată temporal.

În cazul analizatorului olfactiv, problema distribuției spațiale se reduce la o problemă de intensitate.

În fine, în cazul analizatorului gustativ pentru localizarea excitantului intervin informații tactile, termice și dureroase, care se transmit prin sistemul trigeminal. Acesta este o componentă a analizatorului cutanat.

■

Din toate cele de mai sus se vede că diferitele calități ale excitanților sînt „extrase" din mesajele aferente prin intervenția a diferite rețele neuronale care execută asupra semnalelor de intrare o serie de operații analitice.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul VII

ANALIZATORII

VII, *1. Generalități.* În general, analizatorii se grupează după diferitele organe receptoare: ochi, organ auditiv etc., fiecare organ receptor constituind o unitate fiziologică. În concepția pavlovistă, organul receptor — cu totalitatea elementelor receptoare — traductoare — formează porțiunea periferică a unei unități funcționale mai complexe, numită analizator. Porțiunea centrală a analizatorului este formată din ansamblul formațiunilor neuronale care transmit și prelucrează informațiile venite de la organul receptor respectiv. La mamifere, porțiunea principală a analizatorului central se află la nivelul scoarței cerebrale (analizatorul cortical).

Pentru fiecare tip de receptor există un analizator. Se poate vorbi astfel de analizatorul vizual, de analizatorul gustativ etc.

După cum se știe, porțiunea periferică traduce mărimile fizice sau chimice excitante în impulsuri nervoase după un anumit cod spațiotemporal, în care intervin ca parametri distribuția spațială a fibrelor aferente excitate și distribuția în timp a frecvenței impulsurilor transmise pe axon.

a. Unul dintre rolurile analizatorului central este de a face să parvină informația de la organul periferic la nivelul suprem de analiză a informațiilor, care la mamifere este cortexul cerebral.

b. Un al doilea rol este reprezentat de realizarea la diferitele sale niveluri a unei grupări, a unei clasificări a informațiilor primite, ceea ce reprezintă un prim nivel al proceselor de recunoaștere.

c. Un al treilea rol constă în distribuirea informațiilor primite de la receptori spre alte etaje subcorticale ale sis-

Scanned with OKEN Scanner

temului nervos, ceea ce permite realizarea reflexelor simple sau complexe subcorticale.

VII, 2. *Transmiterea informației prin analizator.* 1. Transmiterea informației de la receptor la proiecția sa pe scoarța cerebrală nu este un simplu proces de transmitere prin stații succesive de retranslare. Existența unor stații neuronale, care întrerup calea de proiecție, ca și structura acestor stații, arată că în cursul înaintării ei spre cortex informația suferă prelucrări succesive. În unele cazuri, structura acestor stații neuronale este extrem de complexă. Acesta este cazul cu nucleii acustici, corpul geniculat lateral, nucleii thalamici etc. În general, numărul neuronilor crește din stație în stație, pe măsură ce calea de transmitere a informației se apropie de cortex, ceea ce indică o prelucrare din ce în ce mai complexă a semnalelor.

2. În acest sens, un prim aspect îl reprezintă accentuarea contrastelor prin fenomene de inhibare reciprocă între căi paralele care vin de la receptori vecini. Fenomenul a fost constatat pentru fotoreceptorii de limulus (Hartline) ; pentru retinele mai complexe (Ratlif) ; pentru sistemul auditiv (Bekesi) ; pentru analizatorul cutanat (Ruch).

Atunci cînd s-au studiat rețelele paucineuronale, a fost descris un model al unei rețele care realizează o astfel de accentuare. Această prelucrare a informației duce, în special, la o punere în evidență, la o adevărată detectare a contururilor.

3. Un alt aspect îl constituie faptul că pe parcursul traseului se calculează și se transmite, pe fiecare canal, o informație referitoare la funcția de autocorelație. În cazul analizorului auditiv, problema a fost studiată de Males și Cherry.

S-a descris (anterior) o rețea paucineuronală cu care se realizează funcția de corelație (operație care permite punerea în evidență a anumitor proprietăți ale mesajelor).

4. O altă intervenție esențială a canalului care unește receptorul cu zona de proiecție corticală este modificarea codului utilizat. De exemplu, la analizorul auditiv, intensitatea excitației sonore este mai întîi codată în frecvența

Scanned with OKEN Scanner

impulsurilor neuronale, situație care apare pînă la corpul geniculat medial. În cortex, intensitatea ajunge codată spațial (Tunturi, Woolsley și Walzl). Mai de mult, Grey Walter a afirmat că în sistemul nervos există configurații neuronale care asigură transformarea unei distribuții spațiale într-o succesiune temporală și invers.

Transpunerea dintr-un cod de frecvență într-un cod spațial se poate realiza printr-un traductor frecvență-poziție sau frecvență-număr. Astfel de traductoare au fost descrise anterior.

După legea de distribuție a pragurilor neuronale în traductorul respectiv se poate realiza o lege liniară sau logaritmică, de corespondență între poziția neuronilor din zona de proiecție corticală și intensitatea semnalului.

După cum au arătat experiențele lui Tunturi, aria excitată variază proporțional cu intensitatea stimulului exprimat în decibeli, deci logaritmic în funcție de intensitate.

Calea auditivă se proiectează pe scoarța cerebrală în aria auditivă primară, unde semnalele sonore sînt codate spațial, potrivit principiului redat în figura 7,1. Se observă că frecvența sunetelor este codată spațial în sens anteroposterior, după o metrică logaritmică, căci există benzi echidistante (la 2 mm pentru pisică) corespunzătoare fiecărei game. Împărțirea spectrului sonor în game corespunde unei împărțiri a sunetelor în funcție de logaritmul frecvenței. Din aceeași figură reiese că intensitatea este codată spațial tot după o metrică logaritmică, deoarece în sens vertical există o zonare a ariei auditive în decibeli, deci în unități logaritmice.

În general, metrica analizatorilor corticali este complexă. În cazul analizatorului cutanat, suprafața corpului are o reprezentare pe scoarța cerebrală în care dimensiunile segmentelor corporale nu sînt în raporturile lor normale ci deformate, deoarece aria suprafeței de proiecție pe scoarță nu variază proporțional cu aria suprafeței corespunzătoare cutanate, ci cu fluxul de informații care vin de la diferitele regiuni ale pielii și mucoaselor. Astfel, limba sau degetele de la mîini au o reprezentare comparativ mult mai largă decît membrul inferior.

Scanned with OKEN Scanner

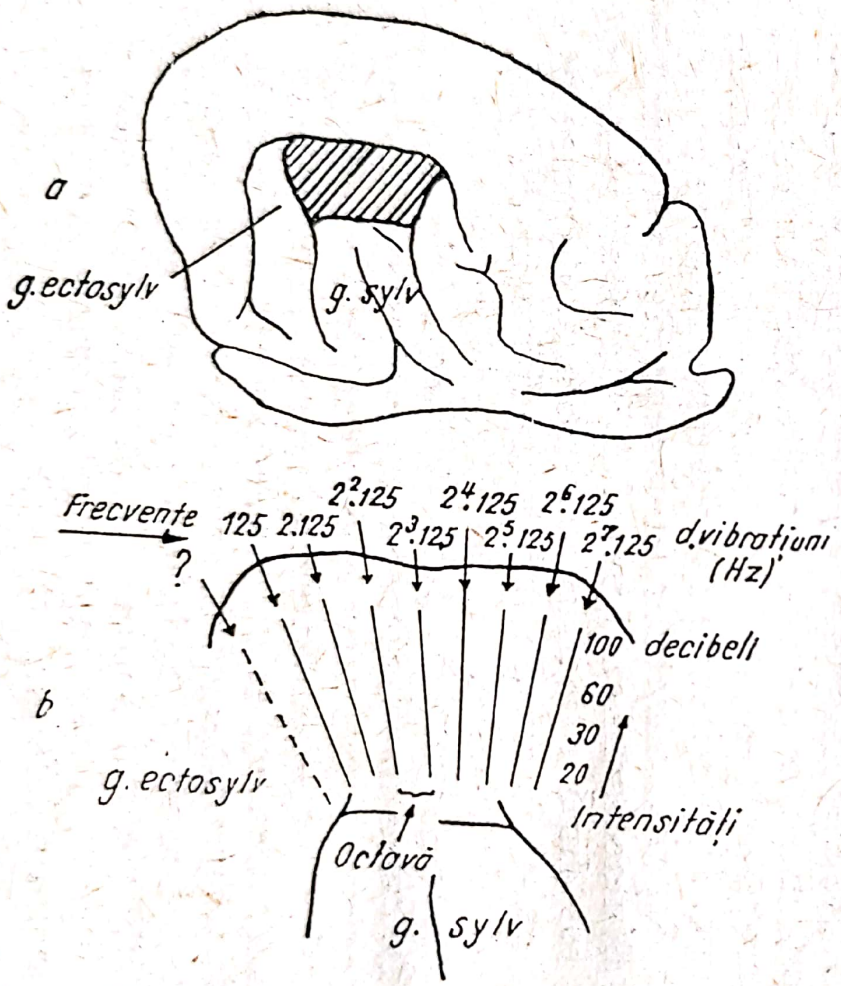


Fig. 7,1. Proiecția corticală a analizatorului auditiv la cîine

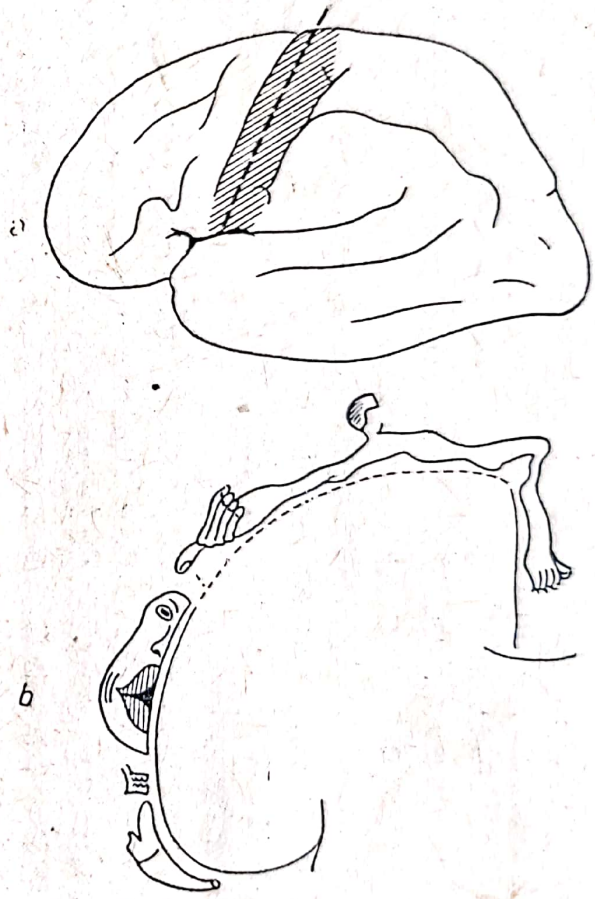


Fig. 7,2. Proiecția corticală a analizatorului cutanat la om

Scanned with OKEN Scanner

Același principiu explică de ce în analizatorul cortical vizual reprezentarea maculei este atît de vastă în raport cu reprezentarea restului retinei.

5. Între două sau mai multe canale paralele se pot produce influențări complexe de tipul calculării unei funcții de heterocorelație. Localizarea în spațiu a unei surse sonore este posibilă prin compararea mesajelor sosite de la cele două urechi. Datorită distanței dintre cele două pavilioane auriculare, sunetele sosesc, la cele două timpane, decalate în timp. Detectarea și măsurarea decalajului sînt unele dintre elementele de bază ale locației sonore.

Pe acest principiu trebuie să funcționeze și sistemele de locație gen sonor, utilizate de unele animale. Astfel, liliacul emite impulsuri sonore de 0,5—10 ms, cu o frecvență a purtătoarei în banda de 40—90 kHz. Liliacul detectează prin unda reflectată obstacole chiar foarte mici — de exemplu o sîrmă cu diametrul de 0,3 mm. Detectarea poziției obstacolului se face prin calcularea unei funcții de heterocorelație între semnalele de ecou recepționate de către fiecare din cele două urechi. Există unii lilieci care pot detecta obstacolul chiar și numai cu o singură ureche — dar cu condiția ca urechea să se miște în permanență. În fond, urechea oscilează între două poziții care realizează condiția unei recepții binaurale. Poate fi vorba și de un sistem de diviziune în timp, fiecare din mesajele corespunzătoare unei poziții fiind considerate ca independent și calculîndu-se, apoi, funcția de corelație între aceste două mesaje.

Și în mediul acvatic se întrebuințează uneori ecolocația. Calcanul emite astfel semnale în banda 196 kHz, iar delfinul cenușiu în banda 10—400 Hz.

În cazul analizatorului vizual, la insecte, deci la animale cu ochi compus, s-a arătat (Reichardt) că între omnatidii (ochi elementari) există o influențare reciprocă, în sensul că se calculează funcția de heterocorelație a mesajelor sosite de la două unități fotoreceptoare vecine. La insecte, mărimea efectului motor produs prin excitații luminoase depinde de funcția de heterocorelație între omnatidiile excitate.

Scanned with OKEN Scanner

În toate aceste cazuri, lucrurile stau ca și cînd neuronii respectivi ar calcula funcția de heterocorelație a mesajelor de la cele două cohlee (Cherry, Bălăceanu) sau omnatidii. Dacă $f_1(t)$ reprezintă mesajul sosit de la cochlea din dreapta, iar $f_2(t)$ mesajul venit de la cohlea din stînga, atunci

$$R = \lim \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) \cdot f_2(t + \Theta)\, dt,$$

unde Θ este decalajul în timp între cele două mesaje, dependent de poziția relativă a sursei sonore față de cele două organe receptoare, iar T reprezintă durata în cursul căreia se face medierea celor două mesaje. Mesajul emis de neuronii pontini este o funcție de R. (Anterior s-a arătat cum poate fi realizată funcția de corelație.)

Studiile morfologice ale lui Statler și cercetările fiziologice ale lui Galambos, Schwartzkopff și Rupert indică drept loc al fuziunii mesajelor sonore nucleul olivar accesoriu (care conține circa 20 000 de neuroni).

În cazul analizatorului vizual, la vertebrate se mai pune problema complexă a suprapunerii imaginilor din cele două retine.

Inițial, s-a crezut că suprapunerea funcțională a celor două imagini retiniene se face în corpul geniculat lateral, în care are loc o proiectare topologică a ambelor retine pe straturi alternative de neuroni. Aceste straturi sînt astfel dispuse încît punctele corespunzătoare ale celor două hemiretine se găsesc suprapuse spațial în două straturi sau lamele de neuroni dispuse alăturat.

Nu s-au găsit încă probe suficiente că mesajele de la punctele corespunzătoare ale celor două hemiretine converg, în corpul geniculat lateral, pe neuroni comuni. Marshall, de altminteri, ca și Bishop, Burke și Davis, Erulkar și Fillenz, a pus în evidență, prin cercetări electrofiziologice, fenomenul de convergență între cele două hemiretine echivalente. Hoghow a pus în evidență neuroni dispuși între lamelele corpului geniculat care ar primi conexiuni de la retina ipso și controlaterală. În modul acesta, se poate ad-

Scanned with OKEN Scanner

mite că în corpul geniculat lateral se face — dacă nu în întregime, cel puțin într-o primă etapă — fuziunea imaginilor vizuale.

O a doua dificultate în înțelegerea mecanismului de fuziune a mesajelor vizuale constă în faptul că diferența dintre ele nu este de natură temporală, ci spațială. Se poate admite că proiectarea mesajelor de la cele două hemiretine corespunzătoare pe ansambluri neuronale lamelare, situate în planuri paralele juxtapuse, realizează condiția necesară ca, fie în neuronii corticali, fie în neuronii geniculați interlamelari, să se poată calcula o funcție de heterocorelație, în care decalajul spațial dintre cele două imagini să fie pus în evidență după convertirea lui într-un decalaj temporal.

6. În drumul lor către etajele superioare ale sistemului nervos, mesajele sînt supuse unei operații de filtrare.

Chiar și traducerea efectuată de receptori presupune o filtrare: din totalul mărimilor care acționează asupra receptorilor, ei filtrează numai stimulii adecvați. Este drept însă că uneori excitanți neadecvați, dar de intensități neobișnuit de mari, pot forța filtrul reprezentat de receptorii periferici. Drept exemplu se pot cita fosfenele, adică senzațiile luminoase produse de excitarea puternică, mecanică sau electrică, a globului ocular sau a nervilor vizuali.

La fel, senzația de durere are la bază un sistem de filtrare de tip trece-sus. Într-adevăr, orice excitant adecvat determină fenomenul de durere dacă intensitatea sa depășește o anumită limită. În limbaj cibernetic, traducem aceasta spunînd că dacă frecvența descărcărilor axonale ale neuronilor receptori depășește un anumit prag, ei antrenează un sistem neuronal care, atunci cînd este excitat, face să apară în conștiință senzația de durere. Acest mecanism de filtrare este situat la nivelul thalamusului: Mountcastle a pus în evidență în nucleii grupului thalamic posterior răspunsuri neuronale care justifică această teză. Acești nuclei ar antrena neuronii formației reticulate, nucleii thalamici intralaminari și aria senzorială II din cortex.

Dezorganizarea acestui sistem de filtrare — prin coborîrea pragului de trecere — se observă în leziunile porțiuni-

Scanned with OKEN Scanner

lor dorsolaterale thalamice și în leziunile parietale, care au repercusiuni morfologice și funcționale asupra sistemului thalamic.

Unele excitații dureroase produse la nivelul analizatorului cutanat (de exemplu înțepăturile) pot ajunge — prin sistemul spino-thalamic posterior — la grupurile neuronale algogene, scurtcircuitînd filtrul trece-sus amintit. În acest caz — și numai în acest caz — se poate spune că înțeparea sau stimularea electrică reprezintă un stimul adecvat și că în piele există algoreceptori speciali diferențiați.

În capitolele următoare se va arăta că senzația (percepția), stările afective, fenomenul atenției au la bază, printre altele, modificarea parametrilor caracteristici ai dispozitivelor de filtrare situate la nivelurile subcorticale ale analizatorilor.

7. Fluxul de informații care vin de la analizator este controlat printr-o serie de conexiuni inverse.

Controlul sistemului nervos asupra receptorilor este multiplu. În retină ajung fibrele retinopete — din care o parte își au originea în nucleul supraoptic; în organul lui Corti ajung fibrele eferente cohleare ale lui Rasmussen — care-și au originea în complexul olivar superior (Desmedt); s-a pus de asemenea în evidență un control central asupra excitabilității canalelor semicirculare (Groen I. J.).

Se cunoaște controlul pe care cortexul cerebral îl exercită asupra diferitelor etaje centrale ale analizatorilor. Desmedt a arătat că aria acustică corticală A IV (o arie polisenzorială) modifică, prin semnalele sale, parametrii funcționali ai nucleului cohlear printr-o cale pararetriculară. Widen și Aymone-Marsan au arătat controlul cortexului vizual asupra corpului geniculat lateral. Se admite astăzi că scoarța cerebrală controlează activitatea thalamusului.

Formațiunea reticulată, care este activată de toate sistemele aferente — deci de toate informațiile care pătrund în sistemul neuronal —, exercită la rîndul ei un control asupra tuturor etajelor analizatorilor (R. Hernandez — Péon).

Scanned with OKEN Scanner

În general, toate aceste sisteme de control acționează asupra dispozitivelor de prelucrare a informației situate de-a lungul analizatorilor.

8. Toate prelucrările de informație amintite, în special influențele reciproce dintre canalele paralele și controlul funcțional impus de formațiunile nervoase centrale asupra analizatorilor și mai ales asupra capătului lor periferic, generează uneori erori în cazul recepției și analizei informației venite de la traductori. Acest lucru trebuie avut în vedere atunci cînd se interpretează în psihologie fenomene ca iluziile senzoriale, interacțiunea stimulilor simultani sau succesivi etc.

Din cele expuse rezultă cît de complexă este transmiterea și prelucrarea informației de la receptori la cortexul cerebral.

VII, *3. Corelarea și clasificarea mesajelor.* 1. Analizatorii nu-și limitează activitatea doar la transmiterea mesajelor nervoase venite de la fiecare receptor în parte. În cadrul fiecărui analizator central, prin intermediul neuronilor care îl constituie, se realizează o corelare, după anumite criterii a diferitelor mesaje simultane sau succesive care vin de la receptorii individuali: este o operație de sinteză esențială pentru funcționarea analizatorilor.

Această corelare de mesaje duce la constituirea unor grupe de mesaje, care capătă prin ele însele o semnificație. În modul acesta se detectează anumite forme, anumite structuri caracteristice. Pentru etajele superioare ale sistemului nervos, ca și pentru comenzile eferente nu contează, în unele cazuri, atît de mult informația izolată venită de la fiecare receptor în parte, cît mai ales informația pe care o reprezintă diferite grupuri de mesaje. Analizatorii realizează deci și o operație de grupare. Această operație este indispensabilă sistemului nervos, deoarece lumea reală nu produce excitanți elementari, ci excitații complexe, corespunzătoare unor excitanți complecși. Aceștia determină în analizator grupuri configurationale temporo-spațiale de mesaje, care sînt apoi prelucrate de rețeaua nervoasă.

Scanned with OKEN Scanner

În diferitele etaje ale nervaxului, însă în mod dominant în cortexul cerebral, mesajele sau grupurile de mesaje venind de la receptori aparținînd unor analizatori diferiți sînt grupate (clasificate) în ansambluri mai mari, și întreaga activitate a sistemului nervos se bazează pe această funcțiune.

2. Se poate considera fiecare excitant elementar ca fiind caracterizat prin cîțiva indici caracteristici, așa-numiții indici de recunoaștere. De exemplu, un excitant sonor sinusoidal este caracterizat prin trei mărimi, și anume amplitudinea, frecvența și faza oscilațiilor.

Numărul notelor caracteristice care pot fi identificate de sistemul nervos depinde și de structura diferiților receptori. Astfel, receptorul auditiv nu este sensibil decît la frecvența și amplitudinea oscilațiilor sinusoidale, faza nefiind sesizată.

Fiecare tip de note poate lua valori într-un anumit domeniu, care depinde de asemenea de structura receptorilor și de posibilitățile de codare în sistemul nervos. De exemplu, analizatorul auditiv uman nu este sensibil decît la semnale cuprinse între circa 32 și 16 000 Hz.

Din punct de vedere matematic, fiecare notă tradusă de sistemul nervos poate fi considerată drept o variabilă independentă, care variază pe o dimensiune într-un spațiu multidimensional abstract E, în care numărul n al dimensiunilor depinde de numărul notelor care pot fi identificate ca atare. Datorită caracterului finit al numărului notelor și al domeniului de variație al acestora, spațiul E este finit. Fiecare excitant elementar este definit în acest spațiu printr-un punct.

În condiții reale, organele receptoare nu sînt excitate de excitanți elementari decît în cazuri excepționale, de exemplu, atingeri punctiforme ale pielii, puncte luminoase monocromatice nemișcate mult timp etc. Excitațiile reale sînt imagini vizuale, sunete complexe, atingeri de obiecte etc. Fiecăruia din acești excitanți complecși îi corespunde un grup de puncte într-un anumit domeniu al spațiului abstract E al analizatorului respectiv.

Problema clasificării stimulilor complecși care vin din lumea exterioară constă în delimitarea — după dife-

Scanned with OKEN Scanner

rite criterii — în spațiul E a unor subspații caracterizate prin valorile pe care le pot lua notele obiectelor clasificate în fiecare din subspațiile considerate.

3. Din punctul de vedere al modului în care funcționează analizatorii, este esențial faptul că organizarea lor face ca ei să emită cîte un mesaj caracteristic pentru unul dintre subspațiile lui E. Lucrurile se petrec ca și cînd analizatorul produce informații care indică apartenența excitantului la grupa de excitanți ce caracterizează subspațiul respectiv.

Analizatorul are deci posibilitatea să compare poziția punctului figurativ corespunzător unei anumite excitații cu prototipurile subspațiilor existente: este operația de identificare sau de recunoaștere, și ea se face pe baza valorilor indicilor caracteristici ai excitantului.

Acest principiu este valabil atît în cadrul unui analizator izolat, cît și în cadrul mult mai larg al ansamblului analizatorilor. În acest caz intervin ariile polisenzoriale din scoarța cerebrală, arii în care se suprapun informațiile provenind de la mai mulți analizatori.

Pentru ca recunoașterea să nu fie ambiguă, este necesar ca pentru oricare subspații I_i și I_j să fie îndeplinite condițiile

$$I_i \in E; \qquad I_j \in E$$
$$I_i \cap I_j = \varnothing$$

în care $i \neq j$, iar $\varnothing$ reprezintă mulțimea vidă.

O parte din aceste subspații de referință sînt realizate filogenetic și stau la baza activității reflexelor necondiționate ale sistemului nervos. Restul se formează prin învățare în cursul existenței. Mecanismul lor de formare este o memorare a corelațiilor statistice. Aceste formări de subspații stau la baza reacțiilor, a reflexelor condiționate și, în general, a comportamentului învățat. Numărul indicilor de recunoaștere cu care lucrează sistemul nervos este foarte mare — deci și numărul subspațiilor de referință este, de asemenea, foarte mare.

4. Cea mai elementară formă de recunoaștere sau de identificare este semnalizarea prezenței sau absenței unui excitant. În acest caz, fenomenul este realizat prin existența

Scanned with OKEN Scanner

unui receptor — care traduce excitantul — și a unui neuron receptor, cu care receptorul este conectat. Condiția necesară și suficientă de recunoaștere a prezenței excitantului este ca intensitatea acestuia să depășească pragul complexului receptor-neuron. Valoarea pragului definește suprafața care separă în spațiul abstract I două subspații.

Receptorul și neuronul receptor indică prezența sau absența excitantului prin prezența sau absența impulsurilor la ieșirea din neuron. Prezența excitantului se definește cu o anumită probabilitate, care tinde spre siguranță, atunci cînd intensitatea stimulului este mare în raport cu pragul; pentru valori mici ale intensității excitantului probabilitatea scade datorită zgomotului de fond.

O altă posibilitate de eroare apare în cazul în care asupra receptorului acționează un excitant neadecvat, dar de intensitate foarte mare. În general, stimulul neadecvat întîmpină un prag extrem de ridicat la receptor.

În rețeaua nervoasă, problema identificării prezenței sau absenței unui stimul implică existența unei căi neuronale de transmitere a informației și intervenția diferiților parametri ce caracterizează neuronii din rețeaua respectivă — caracterizată și ea printr-o anumită distribuție topologică.

În rețelele nervoase intervine și un alt factor de eroare, în legătură cu probabilitatea ca un neuron aparținînd unei regiuni să influențeze neuronii aparținînd unei alte regiuni. În acest caz, neuronii nu sînt influențați pe calea sinaptică normală, ci pe cale efaptică, fie prin fenomene de vecinătate — de cîmp —, fie prin atingeri anormale, provocate de leziuni. Calea influențată nu identifică transmisia efaptică, ea transmite mai departe informații care sînt interpretate ca venind pe cale sinaptică — deci avînd un conținut informațional complet diferit. Este un fenomen de *diafonie*, cunoscut mai de mult în tehnică și regăsit recent în fiziologie și mai ales în fiziopatologia sistemului nervos.

5. Un fenomen de identificare mai complex constă în recunoașterea intensității unui stimul a cărui calitate a

fost recunoscută pe baza principiilor expuse anterior. În sistemul nervos, intensitatea este tradusă în două moduri: prin numărul de canale paralele excitate — codare spațială; prin frecvența impulsurilor axonale — codare temporală. În rețeaua nervoasă, codul temporal este tradus în cod spațial, astfel încît, pînă la urmă, numărul neuronilor excitați în capătul cortical al analizatorilor este o funcție

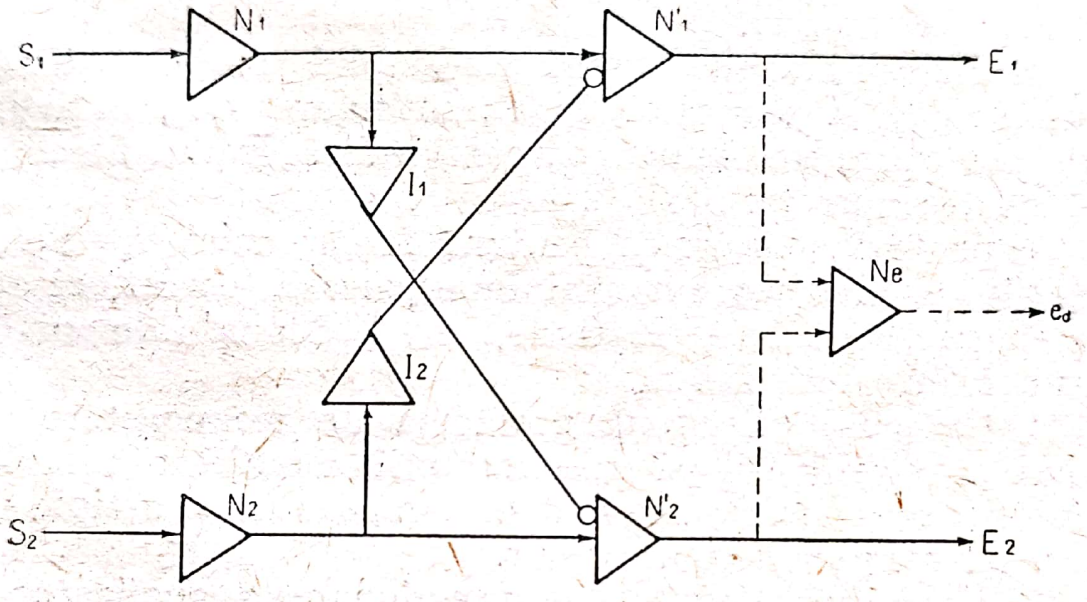


Fig. 7,3. Rețea de detectat diferențe (legenda în text)

de intensitate. Toată problema identificării intensității constă în a semnaliza spațial întinderea teritoriului cortical excitat. Cu alte cuvinte, trebuie să existe un aranjament neuronal, care să selecteze cîte o ieșire din analizator în funcție de numărul neuronilor excitați. Semnalul de ieșire va indica pragul cel mai ridicat care a fost despășit de excitația inițială. Ne găsim în fața unui dispozitiv care funcționează ca un traductor intensitate-poziție (cf. figura 4,13).

6. Dacă pe două canale paralele circulă excitații diferite, rețeaua neuronală poate semnaliza existența unei diferențe de intensitate între aceste excitații, sau poate semnaliza egalitatea acelor intensități. În unele cazuri, rețeaua semnalizează canalul pe care excitația are intensitatea maximă.

Se pot imagina cu ușurință rețele care să aibă astfel de proprietăți. Rashewsky a studiat, din punct de vedere topologic și matematic, rețele neuronale de acest tip.

Figura 7,3 redă schema unei rețele ce semnalizează prin E_1 sau E_2, care dintre cele două semnale S_1 sau S_2 e mai puternic.

Dacă se adaugă neuronul N_e, atunci la ieșirea acestuia apare semnalul e_d, care indică existența unei diferențe și chiar valoarea ei.

În fine, dacă se adaugă sistemului un generator de semnale (6) și neuronul N_e(ca în figura 7,4), la ieșirea acestuia apare un semnal e_s, care indică gradul de similitudine a semnalelor S_1 și S_2.

Se poate demonstra că, pentru diferențe mici ($S_1 - S_2 \leqslant h$), rețelele de mai sus nu mai funcționează corect, ci apar fluctuații sesizabile statistic, care depind de nivelul zgomotului din sistem.

7. Cea mai complexă problemă de recunoaștere este aceea a clasificării și recunoașterii mesajelor complexe care vin prin mai multe canale paralele. Un caz tipic este acela al recunoașterii formelor.

Din studiul modului de funcționare a analizatorului vizual rezultă că recunoașterea formelor implică prelucrarea informației venite de la receptori. Această informație este supusă acțiunilor succesive ale unor operatori, fiecare efectuînd o anumită transformare.

a. O transformare simplă este reprezentată de convergența mai multor receptori pe un singur neuron (cf. figura 4,14). În cazul celulelor ganglionare ale retinei, asupra fiecăreia din ele converg un număr de canale (receptor-celulă bipolară). Ansamblul receptorilor care corespunde unei celule ganglionare definește un cîmp receptor. Celula ganglionară are un anumit prag și emite impulsuri care depind de suma excitațiilor venite de la receptorii cîmpului. Forma ovală alungită a cîmpului și poziția lui pe retină fac ca semnalele de intrare în celula ganglionară, deci în fibrele fasciculului optic, să indice poziția și să semnalizeze anumite direcții preferențiale. Retina identifică deci anumite forme elementare. Ea informează sistemul nervos

central despre prezența sau absența unor componente longitudinale, pe anumite direcții, în formele proiectate de sistemul optic al ochiului asupra retinei.

Cercetările lui Sutherland au arătat că la *Octopus vulgaris* ochiul discriminează două direcții ortogonale

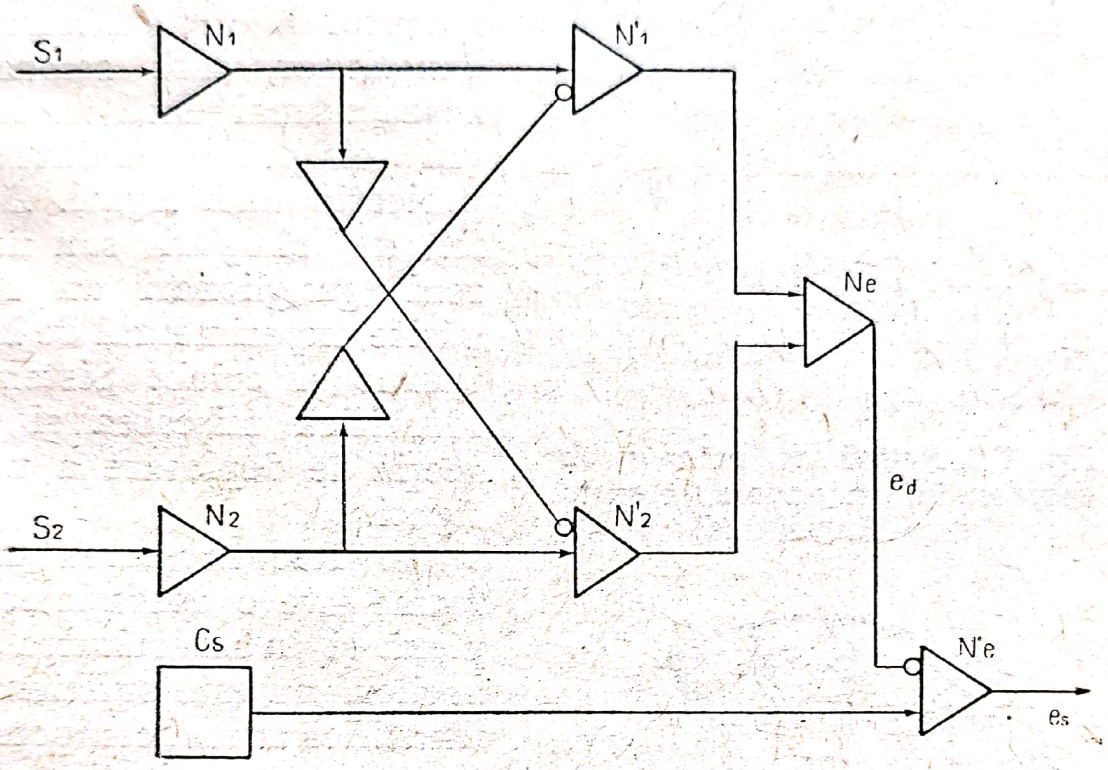


Fig. 7,4. Rețea de detectat similitudini (legendă în text)

preferențiale, perpendiculare între ele. Datorită intervenției rețelei nervoase, fiecare figură este analizată în proiecțiile ei după cele două direcții. Cercetările lui Young arată că în retina de Octopus, celulelor ganglionare le corespund cîmpuri retiniene alungite, eliptice, majoritatea acestor cîmpuri fiind dispusă pe două direcții perpendiculare (cf. figura 7,5).

Alte cercetări atestă prezența cîmpurilor retiniene ovalare și la vertebrate. Identificarea direcțiilor de către sistemul retinian al vertebratelor a fost stabilită prin cercetările lui Sutherland, Basson etc.

Datele de fiziologie ne permit să afirmăm că dispoziția cîmpurilor în retina vertebratelor se face predominent

Scanned with OKEN Scanner

pe două direcţii, corespunzînd coordonatelor polare ale retinelor (cf. figura 7,6) (Bălăceanu şi Nicolau).

b. Dacă neuronul ganglionar traduce în frecvenţă nu suma excitaţiilor primite, ci derivata, în raport cu timpul acestei sume, sîntem în prezenţa unui cîmp receptor şi a unui neuron ganglionar, care semnalizează numai dacă în lungul cîmpului înaintează proiecţia unei figuri. Astfel de cîmpuri sau neuroni ganglionari au fost găsite experimental de Maturano şi colab. Sistemul identifică mişcarea şi direcţia de deplasare a unei figuri.

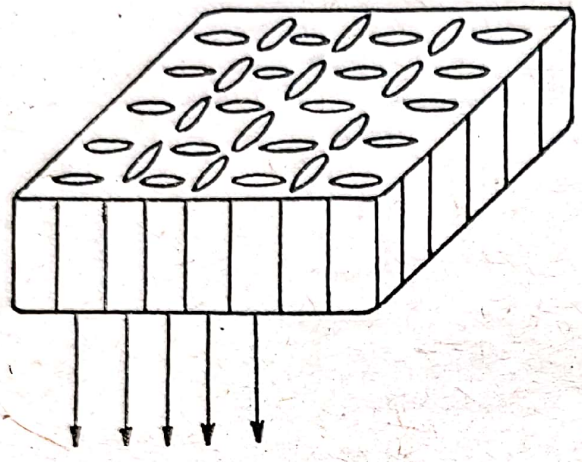


Fig. 7,5. Retină de octopus cu coordonate ortogonale (în parte după Sutherland)

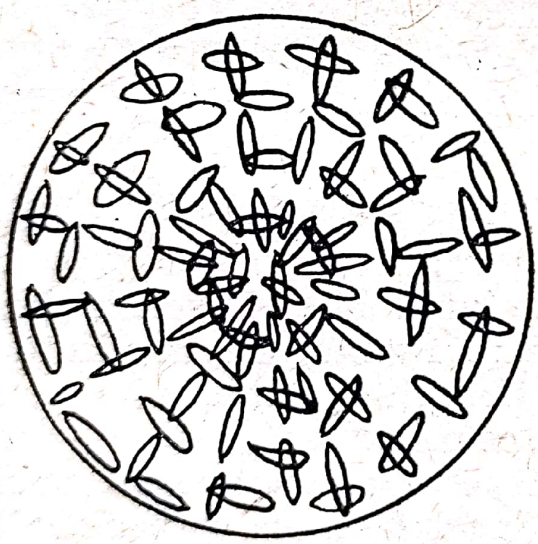


Fig. 7,6. Retină de vertebrat cu coordonate polare

8. Recunoaşterea unei forme este o operaţie complexă şi în majoritatea cazurilor, nu este suficient a identifica numai componentele unor excitaţii complexe, în raport cu un sistem de două axe ortogonale.

a. Pentru recunoaşterea unei figuri este necesar ca, într-o primă etapă, mesajele venite de la receptori să sufere o serie de transformări, cum ar fi: evidenţierea conturului, standardizarea sa etc.

Aceste operaţii pot fi realizate în etape succesive, prin prelucrări ale mesajelor în diferitele etaje ale unui analizator. Natura operaţiei efectuate de fiecare etaj neuronal depinde de structura acestuia.

Scanned with OKEN Scanner

Neurofiziologia nu oferă încă un material suficient pentru precizarea structurii acestor etaje. Se pot însă analiza modele heuristice de reţele neuronale care să efectueze diferite tipuri de prelucrări.

Evidenţierea conturului se poate face urmărind, de exemplu, cu un organ mobil — mînă, glob ocular etc. — conturul figurii, analizînd apoi în reţeaua neuronală traiectoria astfel realizată.

Conturul poate fi analizat spaţial şi în alt mod. Să considerăm cazul cel mai simplu, al unei imagini circulare, care se detaşează pe un fond de culoare diferită. Printr-o operaţie de analizare dinamică a imaginii se poate explora imaginea linie cu linie — ca în televiziune — reţinînd numai acele puncte în care variază intensitatea stimulului respectiv. Reţinînd aceste puncte şi reproiectîndu-le pe un plan similar celui iniţial, se obţine conturul imaginii iniţiale. Aceasta implică existenţa în reţeaua nervoasă a unui sistem oarecare de baleiaj.

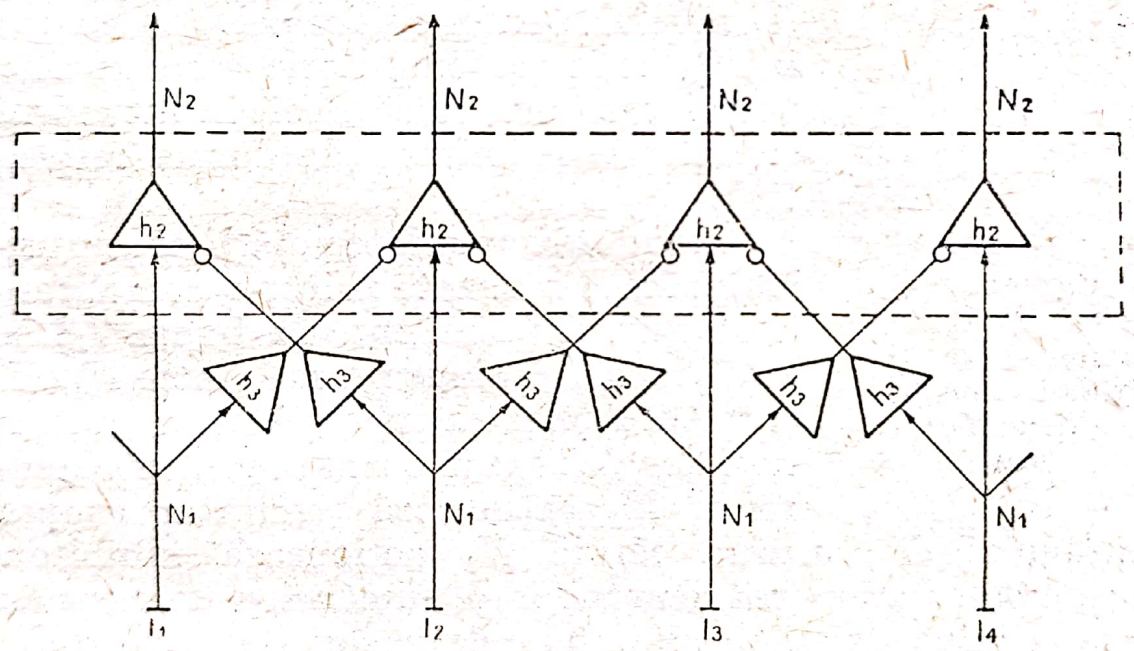


Fig. 7,7. Reţea de izolare a contururilor (legenda în text)

Conturul poate fi detaşat şi prin operaţii spaţiale statice. Un astfel de model îl reprezintă reţelele care accentuează contrastele şi care funcţionează pe principiul inervaţiei reciproce (fig. 7,7). Putem considera întregul cîmp de

Scanned with OKEN Scanner
18-10-19

proiecţie ca fiind format din neuroni care lucrează împreună într-un sistem de canale paralele, înzestrat cu dispozitive de accentuare a contrastelor. Fiecare sistem de accentuare conlucrează cu neuronii din canalele vecine şi rezultanta acestei conlucrări este proiectată pe un alt cîmp, analog celui iniţial. Se vede că fiecare neuron de rang II (N_2) primeşte un semnal excitator de la neuronul de rang I (N_1) de pe acelaşi canal şi semnale înhibitorii din canalele vecine. Legătura funcţională cu canalele vecine este realizată prin intermediul unor neuroni h_3 dispuşi între canale. Organizare de acest fel se găseşte, de exemplu, la nivelul retinei. Rolul neuronilor h_3 e îndeplinit de sistemul celulelor amacrine (Bălăceanu şi Nicolau). Sistemul pune în evidenţă conturul unei forme oarecare, deoarece la nivelul periferiei formei (al conturului), acţiunea inhibitorie a neuronilor vecini este mai mică decît în interiorul suprafeţei delimitată de forma respectivă.

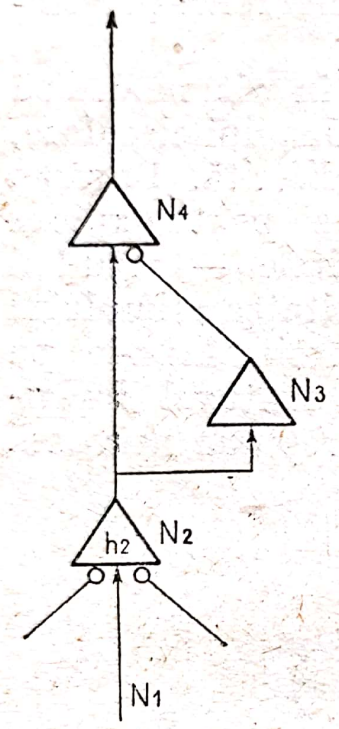


Fig. 7,8. Principiul de organizare al reţelei de standardizare a intensităţii contururilor (legenda în text)

Standardizarea intensităţii contururilor poate fi realizată printr-o complicare a modelului precedent. În figura 7,8 se arată izolat un singur canal. Între N_1, N_2 şi restul reţelei există aceleaşi raporturi funcţionale ca şi în cazul precedent. Neuronul N_2 acţionează excitator asupra neuronului N_4, asupra căruia N_3 acţionează inhibitor. Dacă între parametrii neuronilor şi numărul n de neuroni ai modelului există o anumită relaţie, ori de cîte ori N_4 primeşte o excitaţie de la N_2, el primeşte, concomitent, o inhibiţie de la N_3 astfel încît emite la rîndul său un semnal constant ca intensitate, indiferent de mărimea excitaţiei lui N_2.

Reţeaua nervoasă trebuie să realizeze şi o standardizare a dimensiunilor contururilor ca şi a poziţiei aces-

Scanned with OKEN Scanner

tora. Se pot imagina modele de rețele care să realizeze aceste operații. Date fiziologice suficiente asupra rețelelor nervoase reale care efectuează astfel de operații încă nu există.

Vedem așadar că în sistemul nervos real, în cadrul analizatorilor, informațiile aferente sînt supuse unor operații relativ complexe. O serie de tulburări neurologice — micropsiile, macropsiile, diferitele distorsiuni patologice ale percepției — sînt expresia unei disfuncții a niveluri-lor neuronale, care în mod normal asigură aducerea contururilor formelor recepționate, prin traductori, la anumite dimensiuni standard și într-o anumită poziție standard.

Este foarte probabil ca aceste standardizări să nu se poată efectua numai în aparatul cortical al analizatorului. Probabil că ele se efectuează prin intervenția neuronilor din aripile situate în jurul regiunilor receptive propriu-zise ale scoarței.

b. În a doua etapă se compară informația privind conturul recepționat cu informațiile stocate în memoria sistemului și referitoare la alte contururi. Operația de recunoaștere propriu-zisă a unei figuri constă în emiterea unui semnal care să indice dacă conturul recepționat C_i este identic sau nu cu un contur stocat C_o.

Putem admite că informațiile despre conturul recepționat C_i au fost mai întîi traduse, astfel încît conturul să fie standardizat ca dimensiune, poziție și intensitate. El este comparat apoi cu diferitele contururi stocate.

Desigur că un caz ideal este acela al coincidenței perfecte dintre conturul recepționat la un moment dat și unul dintre contururile stocate în memorie. De cele mai multe ori, rețeaua nervoasă consideră însă ca avînd loc o recunoaștere, atunci cînd între cele două contururi există o diferență suficient de mică. Evaluarea diferenței se poate face în moduri diferite. De exemplu, se poate considera imaginea proiectată într-un sistem de coordonate, fiecare punct al conturului recepționat fiind dat printr-un vector de poziție $\bar{r}$, iar poziția unui punct al imaginii stocate cu care se compară printr-un vec-

Scanned with OKEN Scanner

tor $\bar{r}_o$. Diferența se poate evalua, de exemplu, cu formula

$$D = \int |C_i - C_o| dC$$

în care dC este elementul de contur.

Dacă $D \leqslant p$, se poate considera că cele două contururi coincid.

Valoarea pragului p depinde de starea sistemului. În anumite stări emoționale, valoarea acestui prag poate fi foarte mare, astfel încît erorile sînt frecvente. Dimpotrivă, în alte cazuri, valoarea pragului este foarte mică, astfel încît discriminarea se face cu precizie.

Ca majoritatea funcțiilor rețelei nervoase, și discriminarea între figuri se poate face cu o precizie foarte bună atunci cînd rețeaua respectivă se antrenează.

Se pot imagina diferite rețele nervoase care să efectueze operațiile descrise anterior.

9. Teoria prezentată permite să se înțeleagă cum se face recunoașterea vizuală a formelor. Chiar și în acest caz, fenomenul este complex. Viziunea binoculară implică suprapunerea a două contururi recepționate, fiecare dintre ele fiind o imagine cvasiplană. Prin suprapunerea acestor două imagini și prin informațiile venite de la proprioceptorii mușchilor care comandă mișcările globilor oculari se stabilește caracterul de „imagine în relief".

Imaginile vizuale sînt apoi identificate în raport cu poziția lor relativă față de corpul celui care le recepționează, ceea ce implică adăugarea unor informații provenind de la proprioceptori în general, și în special de la cei ai mușchilor cervicali.

Imaginile vizuale sînt însă raportate și la cîmpul gravitațional terestru — ceea ce presupune contribuția unor informații provenind de la labirintul posterior.

Imaginea, inițial bidimensională, se complică prin noile dimensiuni date de tensiunea mușchilor oculo-motori, a mușchilor cervicali posteriori, de poziția otoliților etc. Se ajunge astfel la o imagine care se comportă ca o hipersuprafață într-un spațiu pluridimensional.

Scanned with OKEN Scanner

Deoarece reţeaua nervoasă are o structură tridimensională, spaţiile n-dimensionale sînt deduse la o sumă de spaţii tridimensionale. Se poate arăta în mod aproximativ cum un spaţiu tridimensional este redus la o succesiune de spaţii bidimensionale, iar fiecare spaţiu bidimensional la o succesiune de spaţii unidimensionale. În mod analog, putem imagina un spaţiu n-dimensional ca putînd fi redus, prin activitatea reţelelor neuronale, la un sistem de spaţii cu ordine de dimensiuni din ce în ce mai mici.

Această reducere trebuie să fie o caracteristică generală a tuturor ariilor polisenzoriale.

10. În cazul analizatorului auditiv, este relativ uşor să înţelegem, pe baza teoriei expuse anterior, cum se face recunoaşterea formelor. Trebuie avut în vedere faptul că din forma iniţială se extrage un contur bidimensional, eventual tridimensional. Formele detectate cu analizatorul tactil se completează prin datele referitoare la temperatură, presiune, proprioceptivitate, astfel încît sîntem din nou conduşi la un spaţiu pluridimensional.

Acest fenomen este general pentru toţi analizatorii. Pretutindeni, informaţia venită de la receptori se codează spaţial. Se realizează astfel, în reţelele neuronale, anumite forme, care apoi sînt recunoscute. Am văzut, de exemplu, că excitaţiile sonore sînt traduse — Tunturi — în cortexul auditiv în forme care evoluează în spaţiul cu două dimensiuni al analizatorului auditiv.

Fenomenul de recunoaştere nu se referă numai la analiza şi sinteza informaţiilor în cadrul unui singur analizator. Obiectele reale determină, prin recepţionări complexe de informaţii, o serie de forme care sînt analizate atît în ariile senzoriale, cît şi în cele polisenzoriale, fiind apoi sintetizate în aşa-numitele arii de asociaţie ale cortexului. Agnoziile apar ca fiind expresia unei disfuncţii la diferite niveluri ale mecanismelor de recunoaştere. Dacă apare imposibilitatea de calculare a diferenţei dintre forma detectată la un moment dat şi formele memorate anterior sau dacă, o dată calculată această diferenţă, nu poate interveni eficient, în reţea apar tulburările de agnozie, cunoscute în diferite sindroame corticale.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul VIII

EFECTORII

VIII, *1. Generalități.* Sistemul nervos primește semnale de la receptori prin nervii aferenți. În rețeaua nervoasă semnalele sînt prelucrate, rețeaua nervoasă emițînd apoi mesaje — prin nervii eferenți — spre organele de execuție, numite și efectori. Sistemul receptori — rețea nervoasă — efectori funcționează în ansamblu ca un vast și complex dispozitiv de automatizare.

2. Unii efectori sînt reprezentați de celulele secretorii, la care debitul substanței secretate este reglat de fibrele eferente ale sistemului vegetativ. În general, terminațiile fibrelor eferente vegetative emit mesajul lor sub formă biochimică (acetilcholină sau noradrenalină). Substanța activă emisă acționează fie direct, asupra activității metabolice a celulei secretorii, fie indirect, prin intermediul modificărilor de flux sanguin.

O situație specială apare în modul în care sistemul nervos central reglează activitatea hipofizei. Neuronii hipothalamici eferenți au o organizare particulară, astfel încît ei emit mesaje biochimice specializate, care acționează asupra celulelor secretorii din hipofiză.

Celulele secretorii endocrine și exocrine constituie o primă categorie de traductori de ieșire ai organismului.

În legătură cu sistemul endocrin, acad. St. Milcu a introdus în știință conceptul de endocrinon, definit ca unitatea cibernetică a sistemului endocrin, unitate formată dintr-o celulă endocrină, asupra căreia acționează semnalele aferente, și care emite, printr-un canal eferent, mesajele ei biochimice care, la rîndul lor, influențează alte celule.

3. Alți efectori sînt reprezentați de fibrele mușchiulare netede, asupra cărora acționează de asemenea fibrele

Scanned with OKEN Scanner

eferente ale sistemului vegetativ. Fluxul de substanţă chimică activă influenţează procesele biochimice din aceste fibre, determinînd efectele mecanice — de contracţie sau de relaxare — ale acestora. Fibrele muşchiulare se comportă deci ca sisteme care traduc semnalele din nervul vegetativ eferent în efecte mecanice. Aspectul cantitativ al acestei traduceri nu este încă pe deplin cunoscut. Problema este dificilă, deoarece intermediarul emis de fibra nervoasă vegetativă difuzează în masa muşchiului neted şi în modul acesta acţionează asupra unui grup variabil de fibre muşchiulare.

4. În cazul muşchiului cardiac, problema informaţională se pune în mod diferit, muşchiul cardiac fiind controlat de un sistem cibernetic propriu, denumit ţesutul cardionector al inimii, care generează şi transmite informaţia ce asigură contracţia ritmică a cordului. Fiecare contracţie este constituită dintr-o succesiune riguros ordonată de contracţii ale elementelor muşchiulare care compun muşchiul cardiac. Din punct de vedere cibernetic, sîntem în prezenţa unui proces care asigură desfăşurarea ritmică a unui program energetic bine precizat.

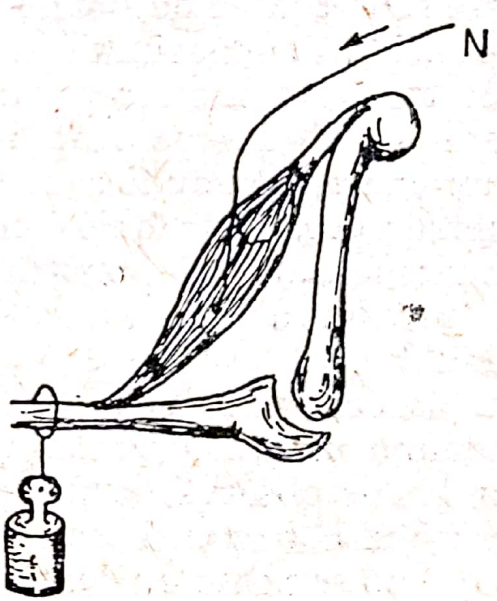


Fig. 8,1. Muşchi scheletic
N — nerv motor

Sistemul nervos acţionează prin fibrele eferente vegetative asupra sistemului cardionector, influenţînd însă numai frecvenţa de repetiţie a contracţiilor, adică ritmul de desfăşurare a programului care corespunde unei contracţii a cordului. Sistemul nervos poate fi considerat drept un dispozitiv cibernetic care acţionează asupra organului de execuţie prin intermediul altui sistem cibernetic şi anume prin intermediul ţesutului cardionector al inimii.

5. Principalii efectori care vor fi studiaţi în prezentul capitol sînt muşchii striaţi, muşchi formaţi dintr-un an-

samblu de fibre muşchiulare striate, asupra cărora acţionează prin calea nervilor motori terminaţiile axonale ale motoneuronilor medulari sau ale nucleilor nervilor cranieni.

6. Amintim că la unele specii de peşti mai există o clasă de efectori şi anume organele electrice, care de fapt sînt fibre muşchiulare modificate ca structură şi care, sub influenţa semnalelor provenite de la nervii eferenţi, generează descărcări electrice, caracterizate prin diferenţe de potenţial de ordinul sutelor de volţi.

De asemenea, la unele specii marine, ca şi la unele insecte, există ţesuturi care generează semnale luminoase. Tot în cadrul sistemului efector trebuie inclus şi sistemul care asigură variaţia pigmentării la unele animale, la care se observă mimetismul cromatic.

VIII. 2. *Muşchii striaţi.* 1. Definiţie şi structură. Dispozitivul energetic care realizează contracţia muşchiulară este reprezentat de sistemul molecular actomiozinic, activat de acidul adenozintrifosforic (ATP). În muşchiul striat, acest sistem molecular are un aranjament spaţial caracteristic, fiind organizat în elemente funcţionale numite sarcomere, care au fiecare 2,3 μ lungime şi 0,5, pînă la 1μ diametru ; acestea trebuie considerate drept unităţile energetice fundamentale ale motilităţii (Huxley şi Niedergerke).

În figura 8,2 se arată, aspectul unei miofibrile muşchiulare.

Sarcomerele se grupează într-o succesiune liniară, formînd miofibrilele. Cu ajutorul metodelor de microscopie simplă se observă în lungul miofibrilelor o structură periodică, ce corespunde sarcomerelor. Cu ajutorul ultramicroscopului se poate evidenţia o structură periodică cu perioada de 400 Å, care corespunde organizării moleculare a miofibrilelor.

În cadrul fibrei muşchiulare, miofibrilele sînt grupate paralel, astfel încît sarcomerul unei miofibrile vine riguros în dreptul sarcomerelor miofibrilelor vecine. Ansamblul miofibrilelor unei fibre muşchiulare (aşa-numitul sarcostil) se află cufundat în sarcoplasmă, care asigură metabolismul. Fibra muşchiulară reprezintă unitatea morfofiziologică

Scanned with OKEN Scanner

de bază a mușchiului. În figura 8,3 este reprezentată o fibră mușchiulară.

Informația care ajunge la aparatul energetic al fibrei mușchiulare provine de la motoneuroni, fiecare motoneuron

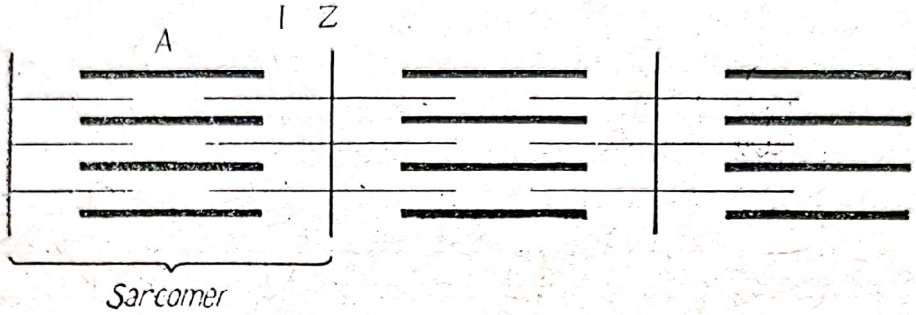


Fig. 8,2. Miofibrilă = ansamblu de filamente actomiozinice
A,Z,I – striațiuni; ▬ – filament de miozină;
—— – filament de actină

excitînd un grup de fibre mușchiulare. Ansamblul fibrelor mușchiulare la care se distribuie informația de la un motoneuron formează, împreună cu acesta, *unitatea motorie*,

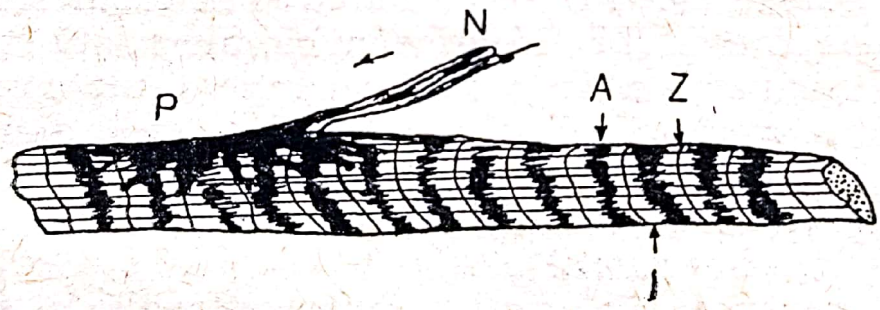


Fig. 8,3. Fibră musculară = ansamblu de miofibrile
A, Z – striațiuni; **N** – fibră (axon) motorie;
P – placă (sinapsă) motorie

care trebuie considerată unitatea cibernetică fundamentală a sistemului motor (*v.* fig. 8,3). Numărul fibrelor mușchiulare dintr-o unitate motorie variază în funcție de tipul de mușchi. Iată numărul mediu de fibre mușchiulare pe unitatea motorie întîlnit în cîțiva mușchi: dreptul extern — 13; mușchiul scăriței — 20; cricotiroidian — 166; lumbricali — 108; tibialul anterior — 610; bicepsul brahial — 750;

Scanned with OKEN Scanner

gastrocnemian — 1730 etc. În cadrul mușchiului, o unitate motorie ocupă un domeniu de formă aproximativ sferică, cu un diametru variabil. De exemplu, în cazul bicepsului, diametrul este de circa 5 mm.

Orice mușchi este, așadar, format din asamblarea unui mare număr de unități motorii.

2. Fibra aferentă și sinapsa neuromușchiulară. Informația este transmisă de motoneuron, în lungul axonului nervului eferent motor, sub forma unor impulsuri modulate în frecvență. Viteza de propagare a acestora este de 40—70 m/s, în cazul sistemului alfa, singurul luat în considerare în lucrarea de față. În funcție de gradul de excitație centrală a acestor neuroni, frecvența impulsurilor de pe axonul motoneuronilor variază între 5 și 50 Hz. Relația cantitativă între starea de excitație centrală a neuronului motor și perioada T a descărcărilor axonale este dată de expresiile matematice stabilite în capitolul II.

Axonul acționează asupra fibrei mușchiulare prin intermediul sinapsei neuromușchiulare. Din punct de vedere informațional, transmiterea informației prin sinapsa neuromușchiulară se face în același fel ca și în cazul sinapselor neuronale (cf. cap. III). Menționăm că, fiind dată structura spațială complexă a aparatului sinaptic neuromușchiular, nu se poate lua în considerare numai o singură dimensiune spațială, ca în cazul sinapselor centrale, ci trebuie să se țină seama de difuziunea și distrugerea acetilcholinei într-un domeniu tridimensional.

De asemenea, în analiza informațională a sinapsei neuro-mușchiulare trebuie să se ia în considerare existența unui zgomot de fond. Analiza statistică a potențialelor miniatură ale plăcilor motorii (Del Castillo și Katz) a indicat existența unui flux aleator de pachete de molecule acetilcholinice în timpul repausului sinapsei.

Moleculele de acetilcholină ajunse la membrana postsinaptică — la nivelul aparatului subneural — se fixează pe o proteină receptoare — un aminopolizaharid — și determină o deformare spațială a acesteia, ceea ce are drept consecință o modificare neselectivă a permeabilității pentru ioni a membranei postsinaptice.

Scanned with OKEN Scanner

3. Sarcolema. Variaţia potenţialului postsinaptic determină, atunci cînd depăşeşte un anumit prag — o depolarizare mai mare de 35 mV —, apariţia unor potenţiale de acţiune în membrana fibrei muşchiulare. Prin extrapolarea datelor cunoscute cu privire la neuron, se poate admite că între durata perioadei descărcărilor ritmice ale membranei fibrei muşchiulare şi mărimea potenţialului de acţiune postsinaptic există o relaţie cantitativă de tipul celei descrisă de noi pentru axon. Rezultă că membrana fibrei muşchiulare se comportă ca un generator de impulsuri cu prag.

Frecvenţa descărcărilor membranei fibrei muşchiulare poate ajunge pînă la 400 Hz, deci la o valoare de aproape zece ori mai mare decît frecvenţa descărcărilor axonului motoneuronului corespunzător, ceea ce indică, aşadar, prezenţa unui dispozitiv de multiplicare a frecvenţei. În general frecvenţa descărcărilor sarcolemei se află cuprinsă între 4 şi 60 Hz. În cazul frecvenţelor cuprinse între 45 şi 60 Hz, se realizează un aspect regulat sinusoidal caracteristic pe electromiogramă şi cunoscut sub numele de ritm Piper (Stoica şi Călcăianu). Viteza de conducere a impulsului pe membrană este de 5 m/s.

4. Sistemul sarcotubular. De la membrana postsinaptică, informaţia trebuie să ajungă la unităţile energetice ale fibrei muşchiulare, la sarcomere. Pentru aceasta, trebuie să existe un sistem de transmisiune a impulsurilor, care să fie plasat între membrana generatoare de impulsuri şi porţiunile excitabile ale sarcomerelor. Deoarece dimensiunile acestora sînt reduse, sistemul respectiv trebuie să fie o structură subcelulară decelabilă în sarcoplasmă cu microscopul electronic.

Cercetările lui Huxley şi Taylor au precizat existenţa în lungul miofibrilelor a unor porţiuni electrice excitabile şi a unor porţiuni inexcitabile ale sarcomerelor.

Cercetările lui Porter şi Palade au pus în evidenţă existenţa în sarcoplasmă a sistemului sarcotubular, interpus între membrana fibrei muşchiulare şi miofibrile. Miofibrilele trec între ochiurile reţelei formate de sistemul sarcotubular. S-a putut preciza că dezvoltarea maximă a sistemului

Scanned with OKEN Scanner

sarcotubular, ca și densitatea maximă de contacte ale acestuia cu miofibrilele au loc la nivelul regiunilor electric excitabile ale acestora (Bennet).

Necesitatea existenței unui sistem de transmisiune a informației la sarcomere, precum și datele funcționale și morfologice de mai sus, ne permit să afirmăm că sistemul sarcotubular este un sistem cibernetic subcelular, intrasarcoplasmatic. Acest sistem, fiind în continuare cu sarcolema, nu face decît să propage în profunzimea fibrei mușchiulare impulsurile generate la suprafața ei.

5. Efectul mecanic mușchiular. Impulsul electric ajuns la sarcomer declanșează lanțul de reacții biochimice care determină contracția mușchiulară. Nu intră în obiectul prezentei lucrări analiza energetică a procesului din sarcomer.

Problema cibernetică constă în stabilirea relației funcționale cantitative dintre impulsuri și contracție. Sîntem în prezența unui efector ce se comportă ca un traductor — amplificator neliniar de ieșire — care transformă un mesaj electrochimic într-un efect mecanic. Problema descrierii matematice a fenomenului este încă deschisă. Schema logică a sistemului efector descris este redată în fig. 8,4.

a. Aparatul contractil al fibrei mușchiulare răspunde la fiecare impuls electric printr-un răspuns contractil de tipul tot sau nimic. La fiecare impuls, datorită intrării simultane în acțiune a tuturor sarcomerelor, fibra mușchiulară răspunde printr-o contracție bruscă. Rezultă că întreaga unitate motorie dă un răspuns motor-pulsatil, a cărui frecvență depinde de frecvența de descărcare a sistemului informațional înterpus între sinapsa neuromușchiulară și sarcostil. Pentru fiecare impuls se dezvoltă, de fiecare dată, o forță mecanică egală, care depinde de numărul sarcomerelor din fiecare fibră și de numărul fibrelor din fiecare unitate motorie. În biceps, de exemplu, o unitate motorie dezvoltă cu prilejul fiecărui răspuns pulsatil o forță de 50 g. Se degajă concluzia importantă că răspunsul mecanic nu este gradat.

b. Fenomenele descrise anterior au loc atunci cînd frecvența de descărcare a membranei mușchiulare are

Scanned with OKEN Scanner

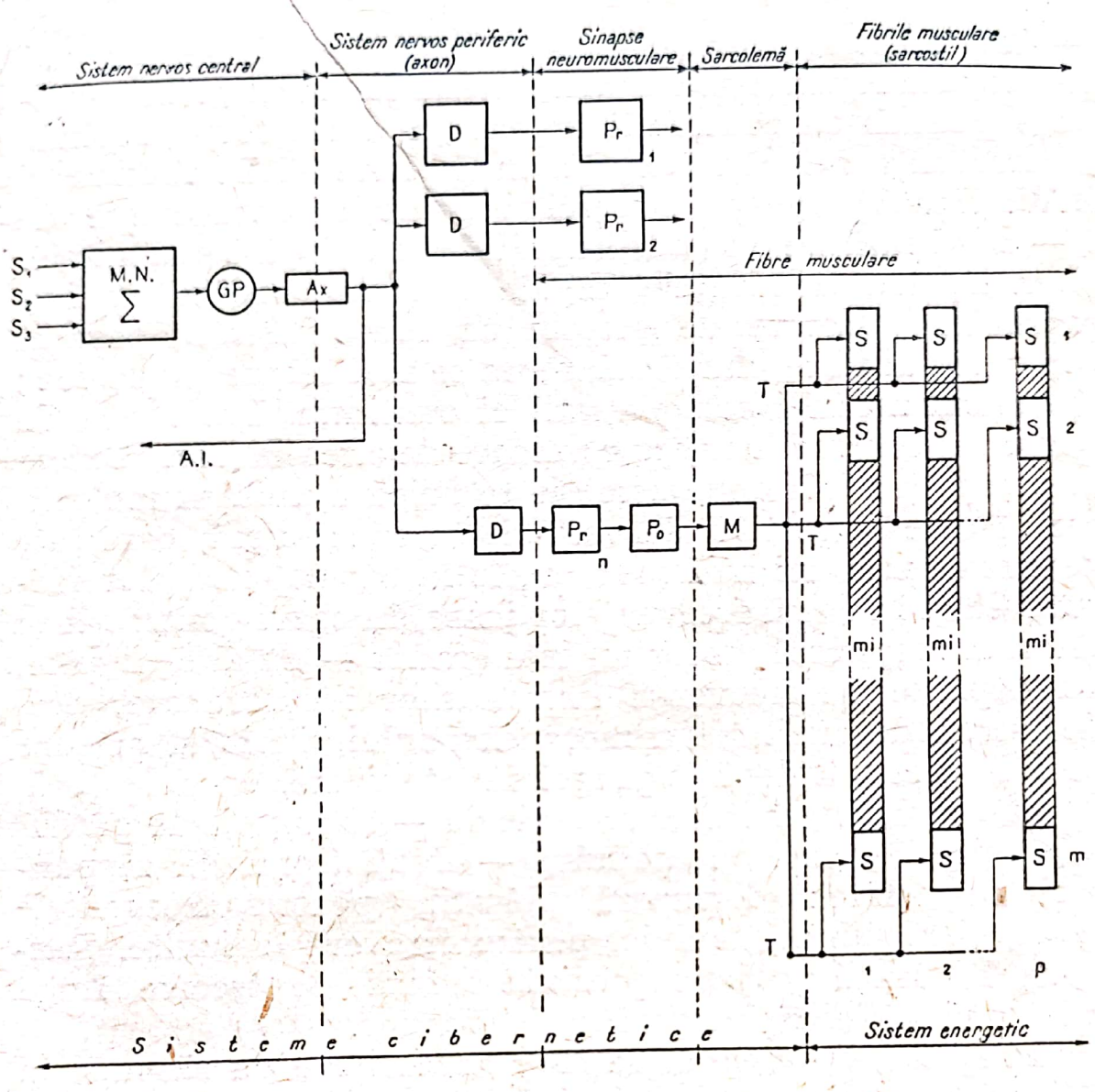


Fig. 8,4. Schema logică a unității motorii

S_1, S_2, S_3 – semnale de intrare; **MN** – motoneuron; **GP** – generator de impulsuri cu prag; **Ax** – axon; **A.I.** – aferentație inversă **D** – decodificator; **Pr** – membrană presinaptică; P_0 – membrană postsinaptică; **M** – membrană mușchiulară; **T** – aparat sarcotubular; **S** – sarcomer; **mi** – miofibrile.

o valoare coborîtă. Pentru frecvențele medii, în aparatul energetic mușchiular apare un fenomen de sumare: răspunsul este tot pulsatil, dar sarcostilul nu ajunge să se relaxeze complet după fiecare contracție. Noua contracție se suprapune unui fond preexistent de contracție, astfel încît forța ei ajunge să fie mai mare decît forța contracției precedente. Pentru frecvențele medii, contracția sarcostilului

Scanned with OKEN Scanner

— deci răspunsul mecanic al unității motorii — nu mai este supusă legii tot sau nimic. Sîntem în prezența unui răspuns pulsatil cu contracții gradate, a căror forță depinde de frecvența impulsurilor din membrană (E.D. Adrian și D.W. Bronk). Forța fiecărei contracții poate crește de 2 — 3 ori față de aceea a impulsului de tip tot sau nimic.

c. Pentru frecvențele rapide și foarte rapide ale impulsurilor generate de membrana mușchiulară, aparatul contractil al fibrei mușchiulare nu se mai relaxează de loc; răspunsul nu mai este pulsatil ci continuu. Frecvența de fuziune a contracțiilor are o valoare de circa 50 Hz. Sîntem în prezența stării de contracție tetanică a unității motorii, caz în care sarcostilul dezvoltă forța sa maximă, care este de circa patru ori mai mare decît în cazul pulsațiilor izolate. Ca și în cazul frecvențelor joase, în cazul contracțiilor tetanice răspunsul motor nu este gradat — cu alte cuvinte, nu depinde de frecvența impulsurilor membranare, deci de starea de excitație a motoneuronului, decît în măsura în care acesta a depășit pragul de tetanizare.

În concluzie, unitatea motorie dă — în funcție de gradul de excitație a motoneuronului — două tipuri de răspunsuri negradate: răspunsul pulsatil, pentru frecvențele joase, și răspunsul tetanic, pentru frecvențele înalte. Răspunsul pulsatil gradat reprezintă o fază de trecere între cele două modalități negradate de răspuns.

Pragurile de trecere de la o modalitate de răspuns la alta nu sînt constante și depind de anumite condiții metabolice — printre altele de concentrațiile unor ioni bivalenți Ca^{++}, Mg^{++} și de starea de tensiune în care se găsesc fibrele mușchiulare, deci de rezistența întîmpinată de mușchi în timpul funcționării sale.

Experiența arată că macroscopic mușchiul răspunde totdeauna gradat, niciodată pulsatil. Aceasta se explică prin modul de conlucrare a unităților motorii în cadrul mușchiului. Este rezultatul inerției mecanice a mușchiului și al organizării rețelei nervoase medulare, în care sînt incluși motoneuronii și care asigură o distribuție temporo-spațială corespunzătoare a excitației la diferitele unități motorii ale mușchiului în timpul contracției mușchiulare.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul IX

ACTIVITATEA MOTORIE REFLEXĂ

IX, *1. Generalităţi.* În cadrul activităţii motorii se pot distinge mai multe niveluri. Activitatea motorie a organismului este asigurată de elementele efectorii motorii — adică de fibrele muşchiulare striate. Desigur că şi fibrele muşchiulare netede participă la activitatea motorie a organismului, dar de ea nu ne vom ocupa în prezenta lucrare.

Declanşarea şi controlul activităţii motorii voluntare sau reflexe se fac de către sistemul nervos central, sub influenţa semnalelor care sosesc din mediul extern şi din mediul intern, prin intermediul receptorilor. Orice manifestare motorie, oricît de simplă ar fi — de exemplu un reflex miotatic — sau oricît de complexă ar fi — de exemplu comportamentul inteligent al omului —, are la bază transmiterea şi prelucrarea unor mesaje care vin de la receptori şi, după ce trec prin sistemul nervos, ajung la efectori.

În prezentul capitol ne vom ocupa de aspectul cibernetic al activităţii motorii reflexe, nivelul cel mai elementar al activităţii motorii.

IX, *2. Sistemul neuronilor intercalari.* Din analiza cibernetică a unităţii motorii se ştie că unitatea motorie nu este aptă de a genera un răspuns motor gradat. O unitate motorie este formată dintr-un neuron motor şi din ansamblul fibrelor muşchiulare elementare pe care le comandă. Un ansamblu de unităţi motorii, un muşchi, produce însă un răspuns muşchiular care este gradat. Aceasta se explică prin faptul că fiecare muşchi este alcătuit din numeroase unităţi motorii, iar atunci cînd muşchiul se contractă, numărul unităţilor motorii, care fiecare în parte se contractă con-

Scanned with OKEN Scanner

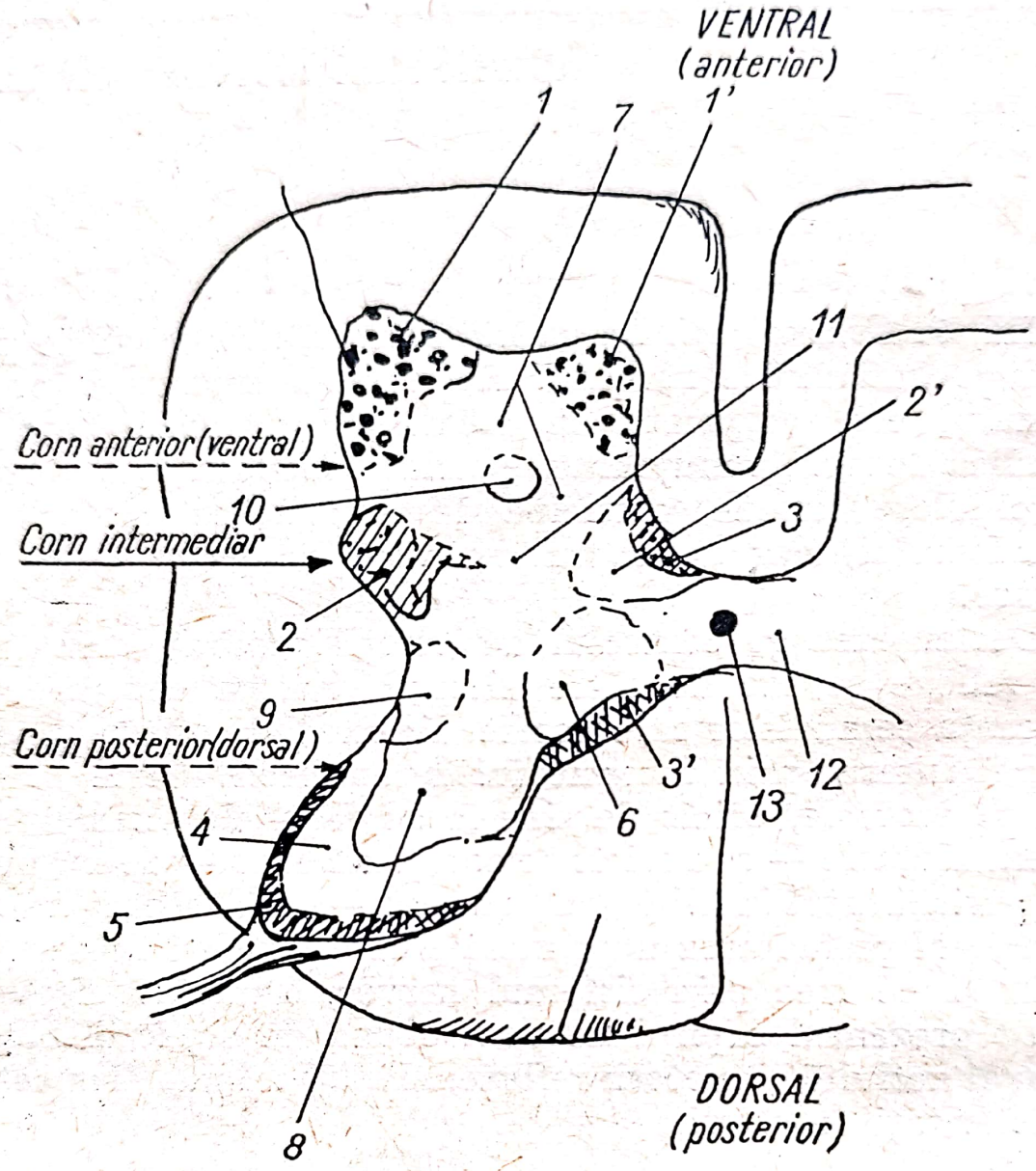


Fig. 9,1. Schema distribuirii neuronilor în substanța cenușie a măduvei

1. – **N.** miorabdotic lat.; **1'.** – **N.** miorabdotic med.; **1.** și **1'.** – motoneuroni; **2.** – **N.** intermediarii lat.; **2'.** – **N.** intermediari med.; **3.** – **N.** corn. comisural ventr.; **3'.** – **N.** corn. comisural dors.; **4.** – Subst. gelatinoasă Rolando; **5.** – Celule posteromarginale; **6.** – **N.** Spino-cerebelos; **7.** – **N.** propriu al cornului ventral (anterior); **8.** – **N.** propriu al cornului dorsal (posterior); **9.** – Subst. reticulată a măduvei; **10.** – **N.** paracentral ventral; **11.** – **N.** propriu (celulele proprii) al zonei intermediare; **12.** – Comisura cenușie; **13.** – Canalul ependimar

Scanned with OKEN Scanner

form legii tot sau nimic, variază în limite largi, practic continuu.

Pentru a explica această situaţie, este necesar a admite existenţa unei reţele neuronale suprapusă unităţilor motorii, reţea care asigură răspunsul gradat al muşchilor. Informaţiile din etajele superioare ale sistemului nervos care acţionează asupra neuronilor motori trebuie să fie prelucrate în reţeaua formată din neuronii intercalari, adică din acei neuroni care sînt dispuşi între neuronii motori şi restul sistemului nervos central.

De aceea, atunci cînd se vorbeşte despre substratul elementar al motilităţii, fie la nivelul măduvei, fie la acela al nucleilor nervilor cranieni, trebuie să includem alături de motoneuroni şi sistemul neuronilor intercalari. La nivelul măduvei, aceştia se află dispuşi printre motoneuroni, constituind cea mai mare parte a substanţei cenuşii medulare.

Cibernetica motilităţii trebuie să clarifice principiile de funcţionare a sistemului neuronilor intercalari, sistem care constituie o juxtapunere de reţele paucineuronale independente, asupra cărora acţionează sistemele de comandă motorie. Numai aferenţele proprioceptive de la elementele fusospirilare din muşchi scurtcircuitează sistemul neuronilor intercalari.

3. Traductorul intensitate-număr. Rolul fundamental al sistemului de neuroni intercalari este asigurarea contracţiei gradate a fiecărui muşchi. Răspunsul gradat se realizează prin numărul variabil de unităţi motorii care, la un moment dat, se află în stare de contracţie. Este evidentă necesitatea existenţei unei reţele neuronale care să asigure antrenarea unui număr de unităţi motorii monoton crescătoare cu intensitatea excitaţiei. Acest sistem de neuroni intercalari trebuie să fie plasat între fibrele care transmit comenzile motorii spre măduvă (de exemplu, fibrele piramidale sau fibrele nociceptive din rădăcinile spinale posterioare) şi motoneuroni. Acest sistem trebuie să traducă intensitatea variabilă a comenzii motorii într-un număr variabil de unităţi motorii activabile.

Intensitatea comenzii motorii depinde de doi parametri: frecvenţa impulsurilor axonale de pe fibrele de comandă

Scanned with OKEN Scanner

motorie și numărul fibrelor de comandă motorie excitate. Traductorul de care ne ocupăm are o singură intrare și traduce intensitatea variabilă a semnalului de intrare într-un număr variabil de ieșiri la care apar semnale.

Principiul unui astfel de traductor intensitate-număr este redat în figura 4,12. Întrarea la care se aplică semnalul de intensitate variabilă excită în paralel un număr de neuroni avînd fiecare un alt prag. În funcție de intensitatea semnalului, se obțin semnale la ieșirea unui număr variat de neuroni.

Sistemul reușește să traducă intensitatea comenzilor motorii în variații ale numărului de ieșire la care există semnal. Notînd cu p_i pragul neuronului i (admițînd că $p_n = np_1$), cu s semnalul de intrare și cu N numărul fibrelor de ieșire la care avem semnal, se poate scrie

$$N = [s/p_1].$$

Dacă se conectează fiecare ieșire la un același număr de fibre mușchiulare, se asigură prin aceasta un răspuns gradat, în funcție de intensitatea excitației.

4. Distribuitorul statistic. Forța de contracție a unui mușchi depinde de numărul de unități motorii aflate la momentul respectiv în stare de contracție. Cercetările de electromiografie arată că în tot timpul în care un mușchi este într-o stare de contracție dată numărul unităților motorii contractate este constant, dar variază în permanență unitățile motorii care sînt contractate. De exemplu, în momentul t_1 este contractată unitatea i, în momentul t_2 unitatea j etc. Datele actuale indică existența unui mecanism aleator prin care se aleg fibrele contractate la un moment dat — dar nu și numărul lor, care e dependent de intensitatea semnalului de comandă.

Evident, în cazul contracției maximale a mușchiului, jocul aleator de mai sus nu se mai produce, dar acesta este un caz limită.

Deci prin jocul trecerii permanente și întîmplătoare a diferitelor unități motorii ale unui mușchi din starea de repaus în cea de excitație și invers se realizează în fiecare moment contracția unui anumit număr de unități motorii.

Scanned with OKEN Scanner

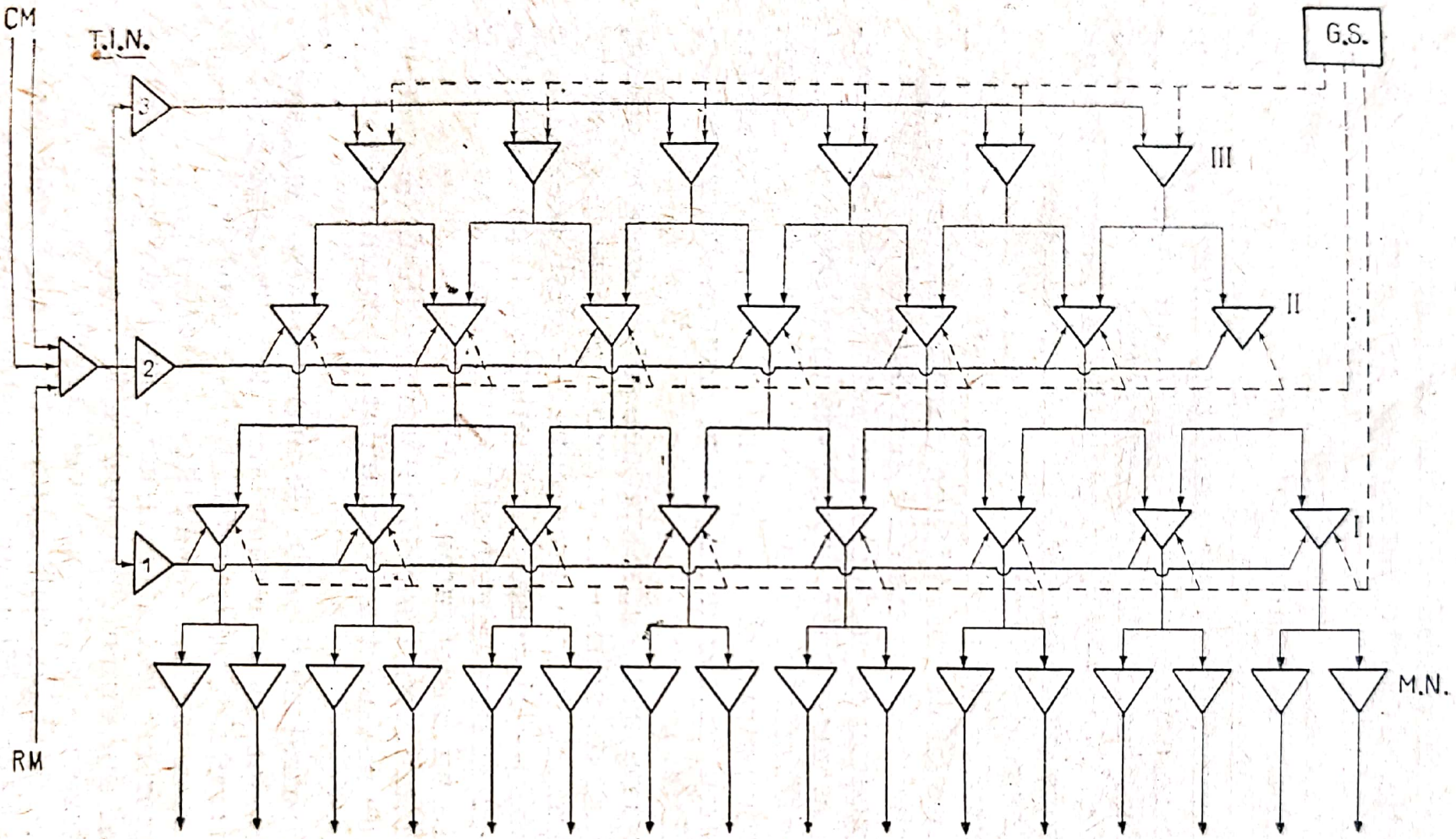


Fig. 9,2. Distribuitor statistic

CM – comandă motorie (intrări); **RM** – reflexe medulare (intrări); **T.I.N.** – traductor intensitate-număr; **GS** – generator de semnale aleatorii; **MN** – motoneuroni (ieşire); **1.2.3** – nivele de praguri (în trad. intensit. număr) **I,II,III** – ordine de mărimi de grupuri (în distribuitorul statistic); ▽ – neuroni; → – sinapse subliminare; ⇢ – sinapse supraliminare

Scanned with OKEN Scanner

Acest lucru este posibil datorită existenţei unui distribuitor statistic, dispozitiv interpus între traductorul intensitate-număr şi motoneuroni, şi realizat tot în cadrul sistemelor neuronilor intercalari. Principiul de funcţionare al unui astfel de distribuitor statistic se redă în figura 9,2.

Fiecare dintre neuronii intercalari ai traductorului intensitate-număr, dacă este excitat produce la ieşire un semnal L, care acţionează asupra unui alt sistem de neuroni intercalari, caracterizaţi printr-un prag $p > L$, neuroni care — la rîndul lor — excită grupe de motoneuroni. Grupele de motoneuroni comandă un număr variabil de fibre. În figura 9,2 situaţia s-a schematizat, admiţînd că numărul fibrelor comandate variază în şirul 2, 4, 6, motoneuroni. Pentru fiecare ordin de mărime există mai multe grupe şi, deci, şi mai mulţi neuroni intercalari.

Fiecare neuron al traductorului intensitate-număr acţionează asupra neuronilor intercalari care corespund unui anumit ordin de mărime. În schema din figura 9,2, un neuron acţionează asupra grupelor de doi motoneuroni, altul asupra celor de patru motoneuroni, altul asupra celor de şase motoneuroni.

Cu cît pragul neuronului traductorului este mai ridicat, cu atît ordinul de mărime al grupelor pe care le comandă est mai mare. Se poate presupune — deşi aceasta este puţin probabil — că neuronul cu pragul cel mai mic acţionează direct asupra motoneuronului, adică asupra unor grupe de cîte un motoneuron.

Se realizează astfel o relaţie între ordinul de mărime al grupelor de motoneuroni comandaţi şi nivelul intensităţii comenzii motorii.

Dar, în cadrul unui ordin de mărime există mai multe grupe, care sînt toate comandate, în momentul în care pragul neuronului traductorului a fost depăşit. Comanda aceasta, s_i, constă dintr-o excitaţie *subliminară* a tuturor neuronilor intercalari care corespund subgrupelor de motoneuroni din grupa i respectivă. Excitaţia fiind subliminară, intrarea în acţiune a unei anumite grupe implică sosirea la neuronii intercalari respectivi a încă unui semnal excitator s_a, tot subliminar, dar astfel încît suma celor

Scanned with OKEN Scanner

două semnale să fie supraliminară: $s_a + s_i \geqslant p_i$, unde p_i este pragul neuronilor din grupa i considerată. Pentru ca sistemul nostru să realizeze „jocul" unităților motorii în timpul contracției, este suficient să admitem că s_a este un semnal aleator.

După cum este și firesc, existența unor fenomene aleatoare presupune existența unui generator de semnale aleatoare. Un astfel de generator poate fi formațiunea recticulată din trunchiul cerebral.

Semnalele întîmplătoare, în timp și spațiu, sînt distribuite neuronilor intercalari. În modul acesta, în cadrul unui ordin de mărime bine determinat de intensitate a comenzii motorii, intră în acțiune sau în repaus, în mod întîmplător, în funcție de semnalele aleatorii, numai unele grupe de motoneuroni.

Realitatea biologică ne face să admitem o complicare a schemei principiale descrise mai sus. În primul rînd, numărul elementelor neuronale este foarte mare, numărul treptelor de excitație este mare și, de asemenea, este mare numărul de grupe de motoneuroni — ceea ce conduce la un număr mare de variante aleatorii posibile. Existența unor sinapse de tip inhibitor, existente atît pentru căile de comandă, cît și pentru generatorul aleator, nuanțează posibilitățile de răspuns ale sistemului.

Schema propusă explică atît răspunsul gradat al mușchiului cît și fenomenul descris de Lloyd, potrivit căruia excitația venită pe calea piramidală ajunge la motoneuroni după ce în prealabil a fost distribuită unui prim nivel de neuroni intercalari, și de aci unui al doilea nivel de neuroni intercalari.

De asemenea, explică convergența mai multor sisteme de comandă motorie (piramidale, extrapiramidale, reflexe polisinaptice) pe sistemul neuronilor intercalari.

Traductorul intensitate-număr, împreună cu distribuitorul statistic, asigură funcționarea mușchiului, realizarea de către acesta a unui anumit nivel de activitate, folosind pe rînd, și numai pentru scurte intervale de timp, activitatea diferitelor fibre mușchiulare, care au astfel posibilitatea ca în timpul repausului să-și refacă potențialul energetic.

Scanned with OKEN Scanner

5. Neuroni intercalari inhibitori. Procesul de comutare a stării de excitaţie de la un motoneuron la altul, în timpul contracţiei muşchiulare, este asigurat de celulele Renshaw, incluse în sistemul neuronilor intercalari.

Se ştie că fiecare motoneuron trimite una sau mai multe colaterale din axonul său înapoi în măduvă, unde acţionează asupra unor celule intercalare, descrise de Renshaw. Aceste celule exercită apoi o acţiune inhibitorie asupra motoneuronilor vecini şi uneori chiar asupra motoneuronului care le excită.

Se ştie că situarea unor elemente inhibitorii între două căi paralele realizează un sistem de accentuare a contrastelor, adică a diferenţelor de nivel de excitare între cele două căi. Acţiunea inhibitorie asupra propriului motoneuron reprezintă un sistem de autoinhibare a unităţii motorii respective, în cazul în care se realizează anumite raporturi de intensitate între semnalele excitatorii şi inhibitorii care converg pe motoneuronul respectiv. După unii autori, inhibarea realizată prin celulele Renshaw a fi în legătură cu perioada de inactivare electrică, detectată pe nervul eferent motor la iniţierea reflexului miotatic. S-ar putea ca acest circuit inhibitor să asigure motoneuronului un regim de funcţionare de tip ON — care nu produce răspuns la ieşire decît numai pentru începutul excitării. În acest caz, este necesar să se ia în considerare o întîrziere pe circuitul respectiv. Aceasta s-ar putea realiza prin intermediul dendritelor motoneuronului (sinapsa dintre celula Renshaw şi motoneuronul ei fiind de tip axodendritic).

Celulele de tip inhibitor mai sînt dispuse în substanţa cenuşie a măduvei. Independent de traducerea intensitate-număr şi de distribuirea statistică a numărului de fibre la motoneuroni, aceste celule inhibitorii asigură realizarea diferitelor modalităţi de inervaţie reciprocă dintre muşchi şi grupele de muşchi, problemă care a fost analizată de către Sherrington.

De asemenea, astfel de celule inhibitorii sînt dispuse pe calea reflexă inhibitorie bisinaptică, de la corpusculii lui Golgi, din aparatul muşchiular.

Scanned with OKEN Scanner

6. Sistemele de memorare. Datele experimentale obţinute prin analiza reflexului nociceptiv (de flexiune) pun în evidenţă existenţa unor postefecte, ceea ce se explică astăzi prin întreţinerea excitaţiei în cadrul sistemului neuronilor intercalari. Această întreţinere se realizează cu circuite neuronale de memorare. În figura 4,4 se redă schema unui astfel de circuit de reverberaţie. Schema este realizată cu un număr minim de neuroni, realitatea biologică putînd fi mult mai complexă, făcînd să participe un număr mai mare de neuroni sau de bucle suprapuse, comenzi multiple de intrare şi de ştergere etc.

Sistemul neuronilor intercalari trebuie să cuprindă şi alte tipuri de circuite de memorare, de exemplu unele avînd schema de principiu redată în figura 4,5. În aceste circuite, neuronul de ieşire primeşte mesaje care provin din mesajul de intrare, dar care parcurg lanţuri neuronale de întîrziere de lungimi variabile. Un astfel de circuit nu are nevoie de semnal de ştergere.

Ambele tipuri de circuite de memorie, prezentate în figurile 4,4 şi 4,5, au fost descrise de Lorente de Nô şi trebuie luate în considerare în analiza informaţională a sistemului motor medular şi a trunchiului cerebral.

IX, *3. Aferentaţia inversă motorie.* 1. Schema logică a sistemului de comandă motorie. Concepţia clasică asupra sistemului motor elementar este aceea a unui sistem de comandă deschis. Dezvoltarea automaticii şi a cibernetiicii a condus la ideea sistemelor motorii cu aferentaţie inversă.

Elementul automatizat este reprezentat de muşchi. Asupra elementului automatizat acţionează neuronii, ce trebuie consideraţi drept dispozitivul automat care, prin mesajele sale (mărimea de execuţie), determină activitatea elementului automatizat. Mărimea de intrare este comanda motorie care a fost prelucrată la nivelul sistemului neuronilor intercalari. Sub influenţa dispozitivului de automatizare, elementul automatizat dezvoltă o activitate biochimică complexă, ce duce la apariţia unei forţe mecanice, care reprezintă forţa de ieşire (cf. fig. 9,3).

Scanned with OKEN Scanner

Se vede că este suficient să cunoaştem valoarea mărimii de intrare şi funcţiile de transfer ale lui *D.A.* şi. *El.A.* pentru a putea calcula operaţional valoarea mărimii de ieşire.

Sistemul motor elementar medular şi al nervilor motori cranieni funcţionează însă ca un sistem de reglaj, ceea ce implică existenţa unui element care să măsoare efectul produs.

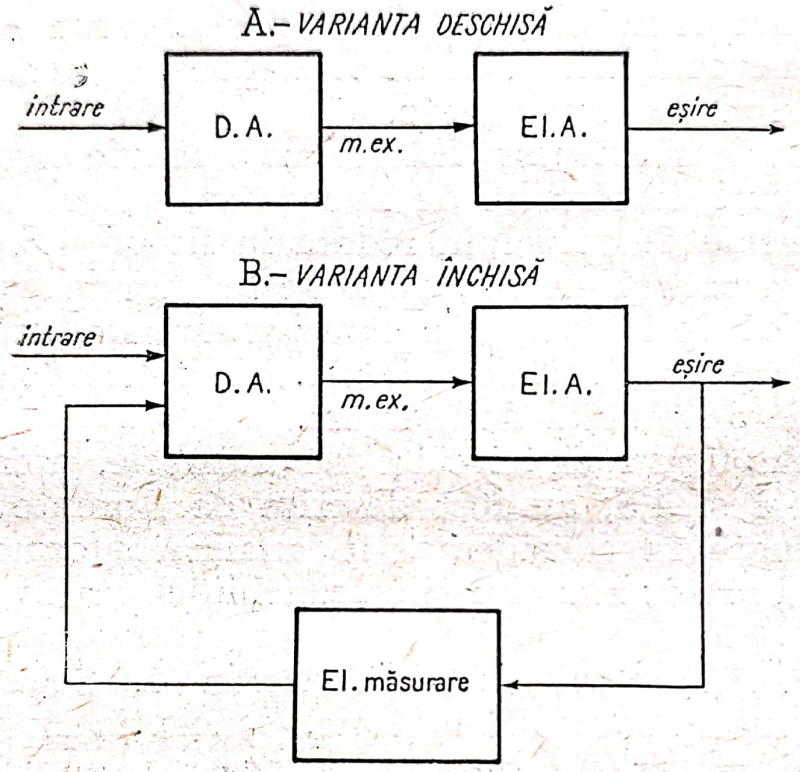


Fig. 9,3. Comanda motorie

A – Varianta deschisă; **B** – Varianta închisă

2. Sistemul corpusculilor lui Golgi. Corpusculii lui Golgi sînt mecanoreceptori situaţi la nivelul tendoanelor muşchilor. Asupra lor acţionează tensiunea mecanică la care este supus tendonul. Corpusculii lui Golgi se află dispuşi în „serie" cu muşchiul.

Pragul acestor mecanoreceptori muşchiulari este de 100 — 200 g.

Informaţia detectată de elementul de măsurare este transmisă spre măduvă printr-un neuron spinal (fibrele I B ale lui Matthews).

Scanned with OKEN Scanner

Cercetări recente arată că între corpusculii lui Golgi şi motoneuroni se află o cale bisinaptică inhibitorie, care se distribuie la toţi motoneuronii muşchiului, respectiv şi la aceia ai muşchilor sinergici. Fiind dat pragul relativ ridicat al elementului de măsurare, sîntem deci în prezenţa unei aferentaţii inverse negative, care intervine atunci cînd tendonul este supus unei tensiuni necanice mai intense.

3. Sistemul fusurilor neuromuşchiulare. Un al doilea tip de elemente de măsurare este reprezentat de fusurile neuromuşchiulare, care sînt intercalate printre unităţile motorii ale muşchiului. Dispunerea lor spaţială în însuşi parenchimul muşchiular face ca aceste fusuri să fie supuse unor tensiuni mecanice atunci cînd muşchiul este întins în mod pasiv. În timpul contracţiei active a muşchiului, tensiunea mecanică a fusurilor este mică.

Analiza fiziologică a fusurilor neuromuşchiulare a arătat că la nivelul lor se găsesc mecanoreceptori care răspund la tracţiunea mecanică pasivă a muşchiului, avînd pragul de 1 — 2 g. Informaţia este transmisă spre măduvă prin două categorii de fibre numite IA şi IIA, ambele fibre aparţinînd unor neuroni spinali (traductorul de reacţie).

Informaţia venită de la sistemul fusurilor neuromuşchiulare ajunge la motoneuroni pe o cale monosinaptică excitatorie, cu ajutorul căreia se realizează o aferentaţie inversă pozitivă. Ea stă la baza reflexului de întindere (miotatic).

4. Schema de reglaj a motricităţii elementare. Schema sistemului motor elementar se prezintă ca în figura 9,5.

Mărimea de acţiune c, care acţionează asupra dispozitivului automat, rezultă din mărimea i de intrare şi mărimile r_1 şi r_2 de reacţie. Din punct de vedere structural, elementul de comparare C, care calculează această rezultantă, este însăşi membrana neuronului ce combină pe i cu r_1 şi r_2.

Un astfel de sistem poate intra în anumite condiţii într-o oscilaţie întreţinută. Această situaţie se întîlneşte în cazul clonusului, care este expresia intrării în oscilaţie a circuitului fusospirilar. Amintim că un studiu fiziologic şi matematic al clonusului, ca sistem de reglaj intrat în oscilaţie, a fost făcut de N. Wiener şi Rosenblueth. Clonusul

Scanned with OKEN Scanner

apare în situaţia întreruperii unor elemente ale căii piramidale. Rezultă deci că funcţiile de transfer ale circuitului depind şi de etajele supramedulare ale sistemului nervos.

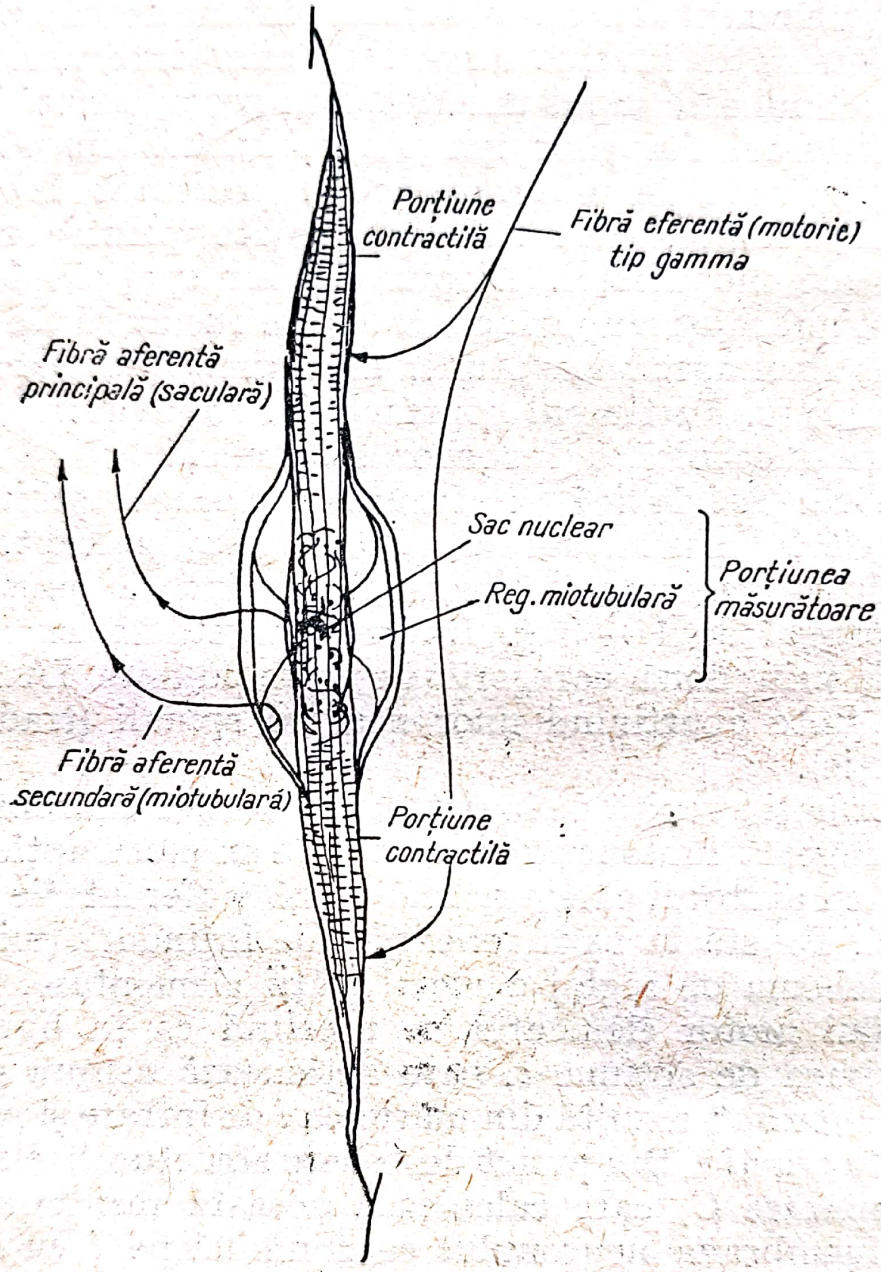


Fig. 9,4. Schema unui fus neuromuscular

Ca o consecinţă a suprimării influenţei etajelor nevraxiale superioare, apare o amplificare a efectului pozitiv al conexiunii inverse, ajungîndu-se, printre altele, la o exagerare a reflexelor miotatice.

Scanned with OKEN Scanner

Circuitul corpusculilor lui Golgi corectează mărimea de intrare, tinzînd să aducă la zero eroarea sistemului.

5. Sistemul eferent gamma. Sistemul de reglare neuromuşchiular este, în realitate, mai complicat, fusul neuro-

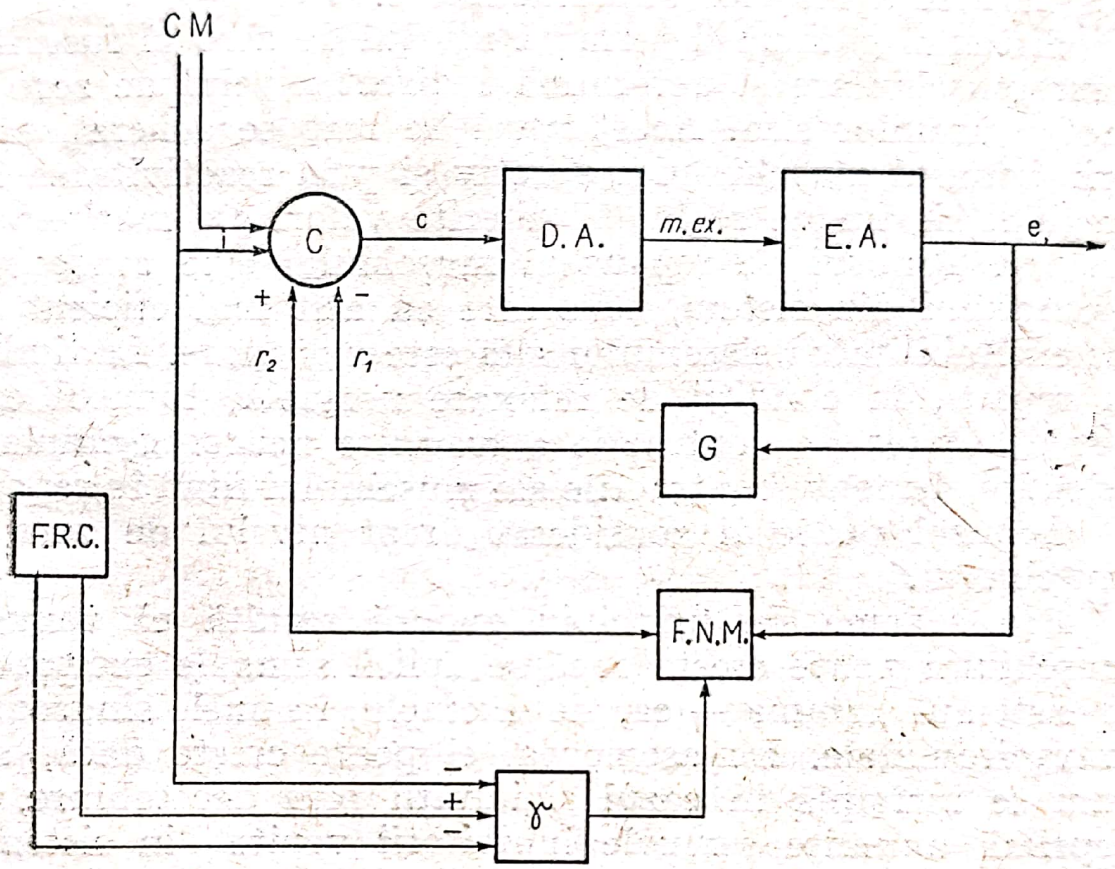


Fig. 9,5. Schema de reglaj a motilităţii elementare

CM – comandă motorie (piramidală); **FRC** – Form. reticulată şi cerebel; **C** – comparator; **DA** – Dispozitiv automat (motoneuroni); **EA** – Element automatizat (muşchi); **G** – Element de măsurare (corpuscul Golgi); **FNM** – Elemente de măsurare (fusuri neuromusculare); γ – sistem de neuroni gamma; + – efecte excitatorii; – – efecte inhibitorii;

muşchiular nefiind un organ pasiv. În figura 9,4 se arată organul pasiv unde se află şi terminaţiile nervoase receptoare. Ambele extremităţi sau ambii poli (proximal şi distal) sînt însă activi, fiind constituiţi din miofibrile. La ambii poli ajung terminaţii motorii care le activează.

Polii activi ai fusului neuromuşchiular sînt comandaţi de un neuron propriu.

Scanned with OKEN Scanner

Sistemul motoneuronilor obişnuiţi se mai numeşte sistemul motoneuronilor alfa, în timp ce sistemul motoneuronilor care comandă fusurile neuromuşchiulare se numeşte sistemul gamma.

Motoneuronii sistemului gamma sînt, la rîndul lor, sub influenţa etajelor supramedulare.

Sistemul gamma determină nivelul de zero al fusurilor neuromuşchiulare şi determină indirect nivelul de zero a motoneuronilor alfa. Acest nivel de zero se concretizează prin tonusul muşchiului respectiv şi prin reactivitatea întregului sistem de reglaj la diferite valori ale mărimii de intrare. Tonusul de repaus al muşchiului este consecinţa zgomotului din sistem, care este cu atît mai eficient cu cît excitabilitatea sistemului alfa este mai mare. La limită, în repaus, în condiţii de relaxare normală, tonusul este dat de starea de contracţie a fusurilor neuromuşchiulare, celelalte elemente contractile ale muşchiului fiind în repaus.

Tonusul poate fi considerat drept nivelul de zero al muşchiului.

Din schema de principiu expusă rezultă că tonusul muşchiular poate creşte dacă se aplică semnale excitatorii în sistemul gamma — ca, de exemplu, în unele sindroame extrapiramidale. De asemenea, el poate creşte dacă, aşa cum se întîmplă în cazul rigidităţii prin decerebrare, se suprimă anumite semnale inhibitorii venite din sistemul reticulat.

Dacă admitem influenţa inhibitorie a sistemului fasciculului piramidal asupra sistemului gamma, schema propusă explică de ce leziunile piramidale duc la o creştere a tonusului muşchiular şi la o reactivitate crescută a întregului sistem faţă de reflexele miotatice, deci şi pentru reflexele nociceptive (sau de flexiune).

De asemenea, această schemă explică de ce în leziunile rădăcinii posterioare apare o hipotonie (suprimarea conexiunii inverse pozitive) şi o dereglare a întregului sistem (tip ataxie spinală), prin suprimarea conexiunii inverse negative.

Apariţia unor hipotonii de origine centrală se poate explica fie prin suprimarea unor semnale excitatorii asupra

Scanned with OKEN Scanner

sistemului gamma (ca în sindromul neocerebelos), fie printr-o creştere a semnalelor inhibitorii (ca în unele sindroame extrapiramidale). Mărimea de referinţă este dată în unele cazuri, de un semnal exterior. În alte cazuri, ea este dată de către pragul neuronului care realizează comparaţia.

Această explicaţie pare plauzibilă şi explică atît existenţa în organism a unei mărimi de referinţă fixă, cît şi eventuala variaţie a acestei mărimi de referinţă, în funcţie de alţi factori externi, modulatori.

IX, *4. Reacţii de susţinere.* La nivelul membrelor care susţin corpul (cele patru membre la patrupede, membrele posterioare sau pelvine la bipede), intervin în mod activ muşchii extensori.

În măduvă există, pentru fiecare membru, un dispozitiv care controlează contracţia tuturor muşchilor extensori şi un altul care controlează contracţia muşchilor flexori. Aceste dispozitive trebuie să fie deosebit de simple, nemobilizînd o populaţie prea mare de neuroni. Le putem imagina ca fiind constituite dintr-o distribuţie logică de axoni sau colaterale axonale la traductorii intensitate — număr de la diferitele unităţi motorii ale membrului respectiv. Declanşarea dispozitivului de extensie determină contracţia extensorilor şi inhibiţia flexorilor şi viceversa, ceea ce dovedeşte că între cele două dispozitive există relaţii de inervaţie reciprocă, realizate printr-o reţea de tipul celei din figura 9,6.

Declanşarea extensiei în membrele de susţinere se numeşte reacţie de susţinere pozitivă. Ea poate fi declanşată de răsfirarea degetelor membrului respectiv (excitaţie proprioceptică) sau de atingerea pielii tălpii respective (excitaţie exteroceptivă cutanată), ca în aşa-numitul reflex de magnet. Aceste reflexe intervin atît în staţiune cît şi în mers, ca un mecanism care intră în funcţiune ori de cîte ori talpa vine în contact cu suprafaţa de susţinere.

De asemenea, reacţia de susţinere pozitivă poate fi declanşată prin excitaţii care provin de la proprioceptorii membrului opus ; de exemplu, flectarea pasivă sau aducţia forţată a acestuia, ca în reflexul lui Philipson sau în *Schun-*

Scanned with OKEN Scanner

kelbeinreaktion. Este vorba de un mecanism care intervine atunci cînd membrul opus ajunge în condiţii în care nu mai poate contribui la susţinerea corpului. Tot pe baza aceluiaşi principiu, reacţia de susţinere pozitivă a unui membru poate fi declanşată de o reacţie dureroasă la nivelul mem-

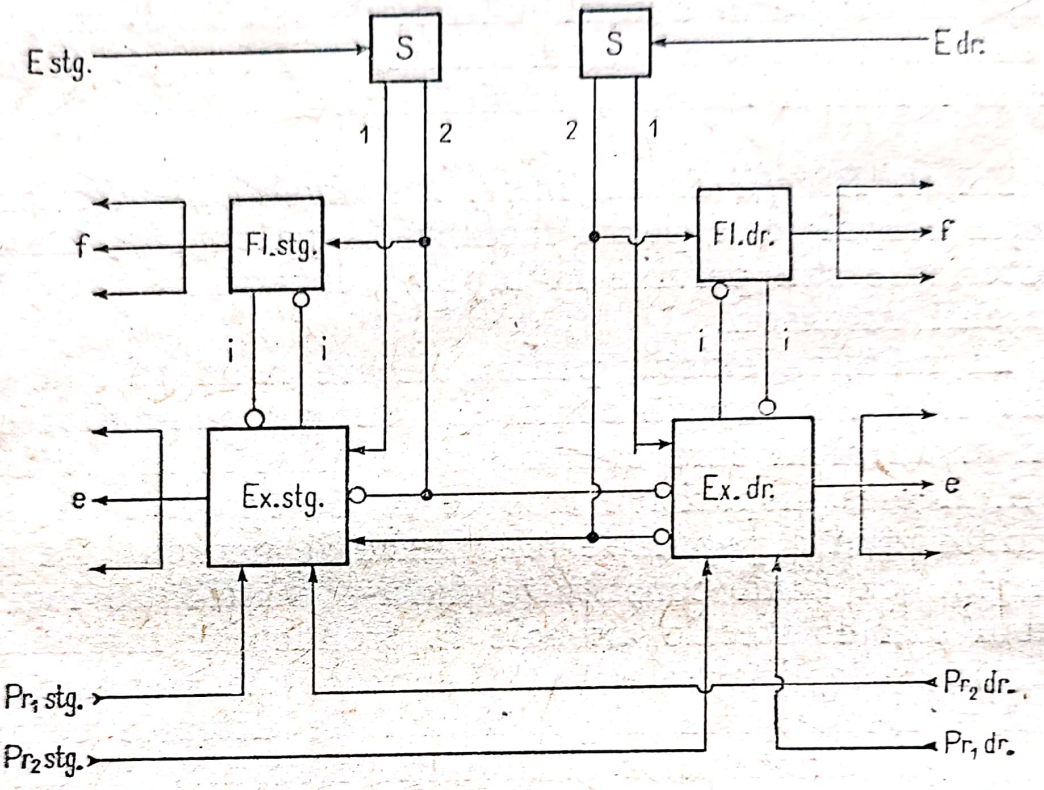


Fig. 9,6. Schema logică a reacţiilor de susţinere (legendă în text)

brului contralateral (reflexul de extensie încrucişată). Această excitaţie dureroasă determină flectarea membrului excitat: este reflexul de flexiune, o reacţie de susţinere negativă (deoarece sustrage membrul respectiv de la funcţia de susţinere). Se mai numeşte reflexul de triplă flexiune, deoarece produce flexiunea piciorului pe gambă, a gambei pe coapsă şi a coapsei în raport cu corpul. Reacţia de susţinere negativă inhibă reacţia de susţinere pozitivă la acelaşi membru, transferînd concomitent (prin reflexul de extensie încrucişată) susţinerea pe membrul controlateral.

Este ceea ce se întîmplă, de exemplu, atunci cînd călcînd pe un obiect tăios retragem brusc piciorul respectiv,

Scanned with OKEN Scanner

transferînd în acelaşi timp întreaga susţinere a corpului pe celălalt picior.

Schema logică a modelului care realizează reacţiile de susţinere este redată în figura 9,6.

Dispozitivele de control al extensorilor *Ex* şi flexorilor *Fl* sînt interconectate prin conexiuni inhibitorii reciproce *i*. Ieşirile *e* din *Ex* se distribuie la muşchii extensori, iar ieşirile *f* din *Fl* se distribuie la muşchii flexori.

Dispozitivul de extensie poate fi declanşat de proprioceptorii homolaterali Pr_1 sau de cei controlaterali Pr_2. Evident, există astfel de dispozitive drepte şi stîngi.

Exteroceptorii cutanaţi *E* acţionează prin intermediul unui sistem de selectare *S*. Excitaţiile slabe (sub pragul durerii) acţionează excitator asupra dispozitivului homolateral de extensie 1 ; excitaţiile puternice dureroase acţionează excitator asupra dispozitivului de flexiune homolateral şi asupra dispozitivului de extensie controlateral 2. Dispozitivul de selectare efectuează o formă extrem de elementară de recunoaştere.

Întregul sistem al reacţiilor de susţinere — studiat aproape exhaustiv de către Sherrington — poate fi pus bine în evidenţă pe animalul sau omul spinal (cu măduva izolată de controlul centrilor nervoşi superiori).

Între dispozitivele de control al extensorilor şi flexorilor nu există numai relaţii statice (posturale). Pe animalul spinal s-au pus în evidenţă interrelaţii cinetice care la un excitant exteroceptiv continuu, provoacă intrarea în oscilaţie fie a sistemului de influenţare reciprocă, format din extensorii şi flexorii homolaterali (ca în reflexul de scărpinat), fie a sistemului format din extensorii şi flexorii încrucişaţi (ca în reflexul de păşit — cînd alternează ritmic, reciproc, extensia unui membru cu flexiunea membrului controlateral).

IX, *5. Reacţii tonice şi posturale.* 1. Reacţiile tonice cervicale. Cercetările lui Magnus şi Kleyn au arătat că excitarea proprioceptorilor cervicali exercită o acţiune organizată asupra tonusului postural al celor patru membre.

Scanned with OKEN Scanner

a. În cazul menţinerii capului în extensie dorsală faţă de corp (după o rotaţie în jurul axului bitemporal al craniului), se produce contracţia tonică a extensorilor membrelor toracice şi contracţia flexorilor membrelor pelvine. În cazul menţinerii capului în flexiune ventrală, se produc reacţiile tonice inverse.

b. În cazul menţinerii capului cu mandibula spre dreapta şi occiputul spre stînga (după o rotaţie), se produce contracţia tonică a extensorilor din dreapta şi a flexorilor de la membrele din stînga. Reacţiile tonice sînt inverse în cazul menţinerii capului rotat cu mandibula spre stînga.

Realizarea reacţiilor tonice cervicale implică existenţa la nivelul regiunii bulbo-pontine a unui dispozitiv logic care să selecteze, pentru fiecare din cele patru variante posibile de combinaţii de semnale venite de la proprioceptorii cervicali, cîte unul din cele patru tipuri de reacţie tonică.

Întrările în dispozitiv sînt reprezentate de colateralele din căile proprioceptive venite de la muşchii cervicali (extensori, flexori, rotatori).

La nivelul dispozitivului intensitatea mesajelor este analizată cu ajutorul pragului neuronilor (operaţie de filtraj selectiv), apoi sînt comparate mesajele sosite de la receptorii simetrici (din dreapta şi din stînga), prin reţelele de detectat diferenţe şi similitudini; în funcţie de rezultatul acestor prelucrări este selectată una dintre cele patru ieşiri existente. Semnalele de la ieşire se distribuie apoi spre formaţiile reticulo-spinale, care asigură distribuirea tonusului muşchiular prin intermediul sistemului eferent gamma.

Nu este exclus să existe şi o acţiune reticulo-spinală directă asupra sistemului motoneuronilor alfa (în special a motoneuronilor alfa mici).

Reacţiile tonice cervicale sînt foarte bine puse în evidenţă pe animalul sau omul decerebrat, la care nu mai există un control al formaţiunilor cerebrale superioare dincolo de punte.

2. Reacţiile tonice labirintice (otolitice). Postura nu depinde numai de poziţia capului în raport cu trunchiul,

Scanned with OKEN Scanner

ci și de poziția capului față de cîmpul gravitațional terestru. Poziția capului în spațiu modulează global tonusul extensorilor membrelor de susținere — informația necesară fiind dată de aparatul otolitic al urechii interne.

În urechea internă (labirint), în afară de organul auditiv (melcul), există și organul echilibrului (vestibulul și canalele semicirculare). În cadrul acestui din urmă organ se află inclus aparatul otolitic, format din două cîmpuri receptoare: macula saculară și macula utriculară, formate din reuniunea unor mecanoreceptori specializați. Asupra fiecăreia din ele acționează prin greutate (deci în funcție de poziția labirintului în cîmpul gravitațional terestru) cîte un otolit, format dintr-un conglomerat de săruri calcaroase reunite printr-o substanță organică. În fiecare ureche se află cîte doi otoliți care au cîte o orientare spațială diferită, astfel încît dau informații care se completează reciproc.

În mod experimental, s-a realizat înlocuirea la unele crustacee a otoliților calcaroși prin otoliți feroși, care puteau fi manevrați din exterior cu ajutorul unui cîmp magnetic, observînd astfel comportamentul animalului în funcție de poziția otoliților, poziție reglabilă după dorința experimentatorului.

Față de cîmpul de gravitație, capul are două grade de libertate: rotația în jurul axei bitemporale și rotația în jurul axei fronto-occipitale. În ambele cazuri este vorba de poziții în spațiu și nu în raport cu trunchiul — caz discutat anterior.

Cercetările lui Magnus și Kleyn pe animalul decerebrat au arătat că în cadrul fiecăreia din cele două mișcări posibile (în cadrul fiecăreia din cele două grade de libertate) există o poziție de minim — cînd tonusul extensorilor este minim — și o poziție de maxim — cînd tonusul extensorilor este maxim; există, de asemenea, poziții de prag, în care influența tonigenă a labirintului începe să se manifeste (fig. 9,7). Fenomenul a fost studiat minuțios de Rademaker.

Ca și în cazul precedent, modelul sistemului care explică acest comportament trebuie să cuprindă un dispozitiv

Scanned with OKEN Scanner

logic de distribuţie a excitaţiei, dispus la nivelul ponto-bulbar şi care acţionează asupra formaţiunilor tonigene spinale. Aci se face distribuirea semnalelor venite de la

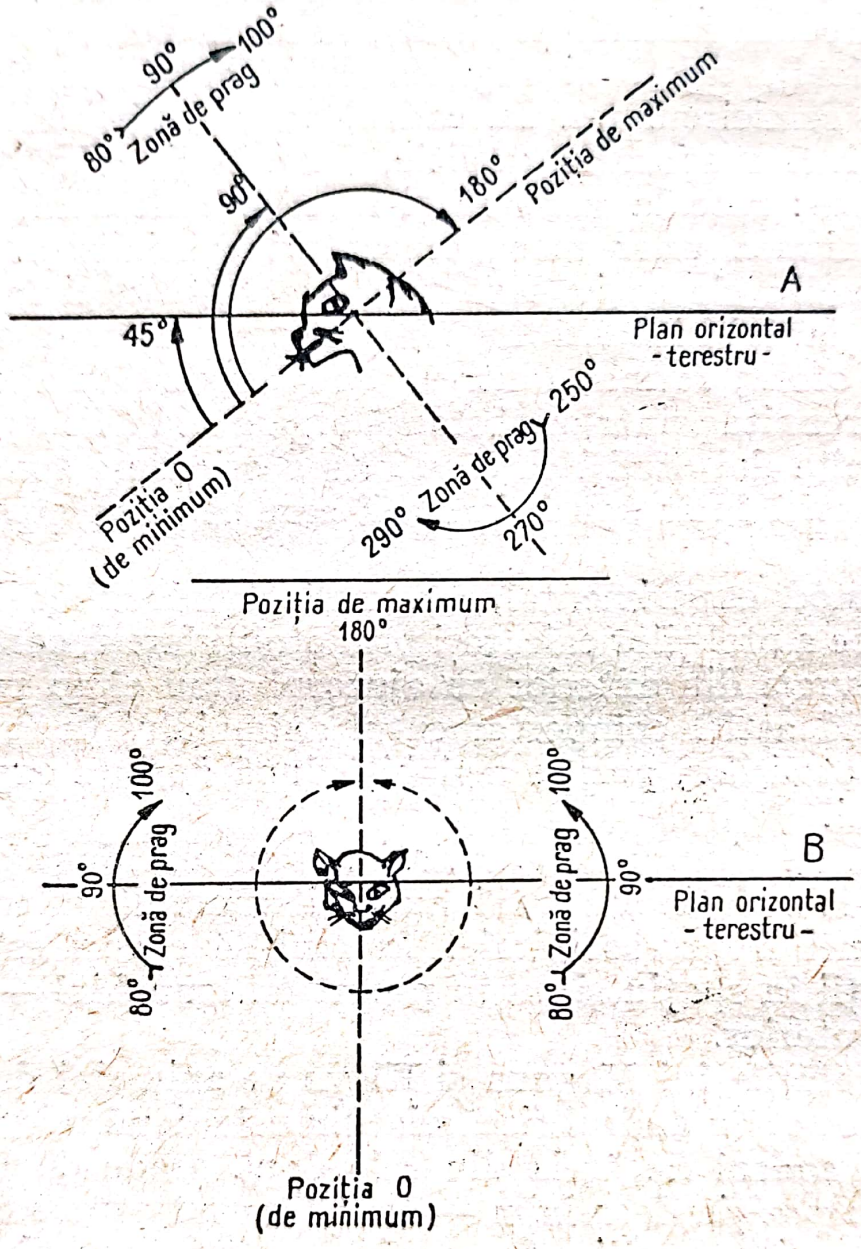


Fig. 9,7. Reacţii tonice labirintice (poziţiile capului în raport cu planul orizontal)

macule printr-un filtraj neuronal. Dacă anumite praguri au fost depăşite, dispozitivul acţionează asupra motoneuronilor medulari extensori prin fibrele vestibulospinale. Acţiunea este proporţională cu intensitatea semnalului venit

de la macule. Dispozitivul a fost localizat în sistemul nucleilor vestibulari, în special în nucleul lui Deiters. Şi în acest caz sîntem în prezenţa unei forme simple de recunoaştere.

Ansamblul reacţiilor posturale (de susţinere, tonice, cervicale şi tonice labirintice), împreună cu sistemul reflexelor miotatice determină o distribuţie posturală a tonusului muşchiular, influenţînd în special muşchii susţinători (antigravitici) ai organismului. Se realizează astfel un fond tonic general care, la patrupede, poate menţine (relativ) poziţia ortostatică, dacă animalul decerebrat a fost aşezat în mod pasiv în această poziţie.

În adevăr, întregul sistem al reacţiilor posturale realizează rigiditatea de decerebrare şi reacţiile tonice care se pot declanşa pe aceste modele fiziologice. Acest fond tonic — extrem de necesar ca punct de plecare pentru celelalte forme de activitate motorie — reprezintă o modalitate primitivă de reglare a motilităţii.

Tonusul muşchilor scheletici mai este influenţat de labirint şi în cazul mişcărilor verticale neuniforme: reacţii de aruncare în jos, reacţii de ascensor etc. În aceste cazuri intervine tot aparatul otolitic şi poate aparatul canalelor semicirculare. Parametrii excitaţiei sînt: direcţia, sensul şi intensitatea acceleraţiei.

Programul, în aceste cazuri, este mai complex, deoarece pentru o anumită mişcare a capului în spaţiu răspunsul motor selectat depinde şi de poziţia iniţială a capului în raport cu trunchiul şi a membrelor faţă de trunchi (cf. fig. 9,8).

În aceste cazuri, distribuţia tonică este determinată de o condiţie logică complexă — ceea ce implică o zonă de convergenţă, la nivelul bulbopontin, a informaţiilor vestibulare şi a informaţiilor proprioceptive —, precum şi existenţa unor programe cu variante multiple.

3. Rotaţii posturale. Un nivel mai înalt de reglare a motilităţii se realizează prin dispozitivele care pot declanşa rotaţii sau torsiuni ale capului şi trunchiului. Organizarea motilităţii vertebratelor are la bază rotaţii posturale de ansamblu în jurul a trei axe fundamentale;

Scanned with OKEN Scanner

a) rotații în jurul axei verticale sau în plan orizontal, în sens orar (levogir) și antiorar (dextrogir) ;

b) rotații în jurul axei orizontale anteroposterioare (perpendiculară pe axa precedentă) sau în plan frontal — înspre stînga sau înspre dreapta ;

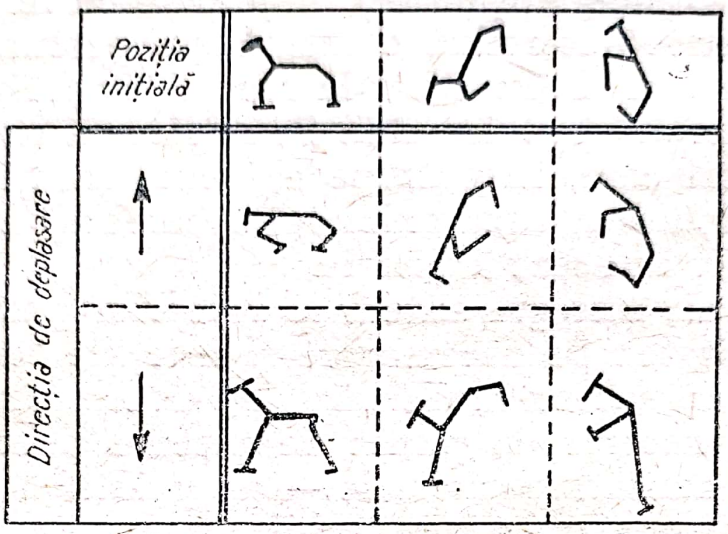


Fig. 9,8. Reacțiile tonice la mișcări verticale

c) rotații în jurul axei orizontale transversale (perpendiculară pe axele precedente) sau în plan sagital în sus și în jos.

Cele trei axe nu depind de planul de organizare al organismului, ci sînt orientate în funcție de cîmpul gravitațional terestru, reprezentînd sistemul fundamental de referință spațială pentru comportamentul motor.

Aspectul rotațiilor — și ca atare corelațiile mușchiulare care stau la baza lor — diferă în funcție de poziția fiziologică a animalului (patruped, biped). La bipede (în special la om), membrele superioare (toracice) sînt antrenate și ele (sub forma unor devieri posturale) atît în cursul rotațiilor în jurul axei verticale, cît și în cursul rotațiilor în jurul axei anteroposterioare.

Cele șase variante de rotație posturală se realizează de către un centru de distribuție de axoni descendenți (pentru fiecare variantă), care acționează apoi asupra motoneuronilor sau neuronilor intercalari medulari. Centrul

respectiv realizează într-o primă etapă sumarea mesajelor care sosesc. El transmite apoi către măduvă semnale care, atît prin frecvența descărcărilor axonale, cît și prin numărul axonilor excitați, traduc intensitatea sumei calculate. Rotația (torsiunea) este un răspuns gradat, care este o funcție neliniară de intensitatea stării de excitație a centrilor rotatori.

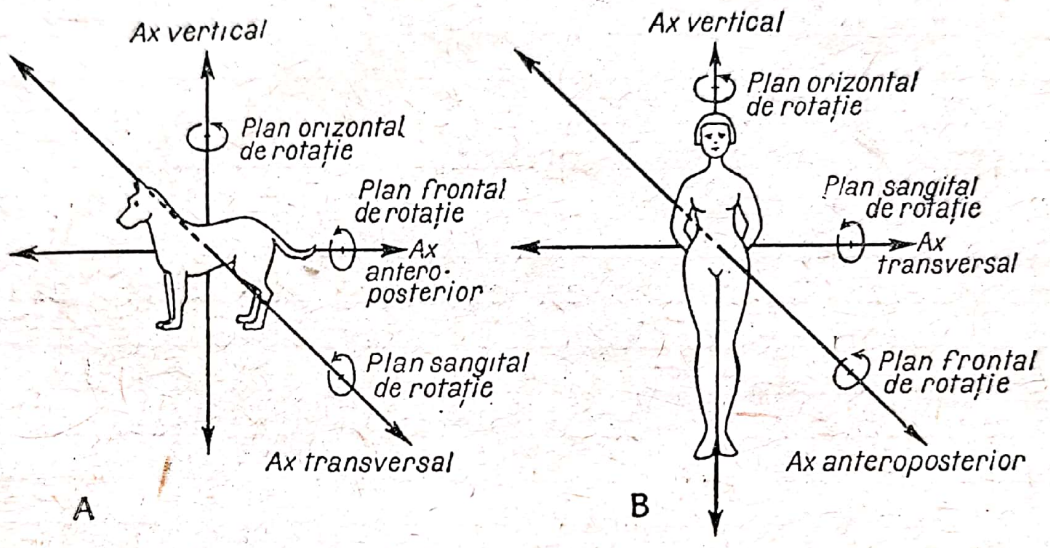


Fig. 9,9. Axele și planurile de rotație la patrupede și om

Se poate admite existența a șase centri rotatori. Unitățile motorii medulare efectuează o sumare a impulsurilor care vin de la acești centri, iar torsiunea realizată este o funcție de această sumă. Se înțelege, astfel, de ce cei doi centri aparținînd aceleiași axe de rotație se echilibrează reciproc: efectele lor sînt antagoniste. Posibilitatea realizării unor rotații posturale mixte, la care participă cu intensități variate centrii aparținînd sistemelor diferitelor axe rotatorii, se explică prin medierea realizată de aparatul efector medular.

Rotațiile posturale intervin atît în procesul de adaptare statică (tonică) generală a organismului, cît și în cazul procesului de propulsie (sau retropropulsie), pe care îl modulează. În acest caz, rolul dominant îl are rotația posturală în jurul axei verticale, care influențează înaintarea, imprimîndu-i devieri spre dreapta sau spre stînga față de traiectoria rectilinie.

De aceea, centrul rotator care comandă această torsiune este cel mai important în planul de organizare a sistemelor giratorii intranevraxiale.

Toți acești centri rotatori au putut fi localizați: ei se află în trunchiul cerebral și își exercită acțiunea lor asupra măduvei prin fibrele descendente vestibulo-spinale, reticulo-spinale și prin unele fibre ale fasciculului longitudinal posterior.

Intrarea principală în acești centri giratori este constituită de fibrele aferente care vin de la canalele semicirculare din urechea internă.

Alături de melc și de aparatul otolitic, în labirint se află și sistemul canalelor semicirculare. Acestea sînt umplute cu un lichid (lichidul endolimfatic) care, atunci cînd se deplasează în raport cu canalele, acționează asupra unor mecanoreceptori situați în extremitatea mai umflată (ampula) a fiecăruia din canale. Aci se află cîte un cîmp receptor, situat în așa-numita creastă ampulară. Asupra mecanoreceptorilor acționează un dispozitiv elastic, numit cupulă, care este, la rîndul lui, supus unor deformări ce depind cantitativ de accelerație, deci de variațiile de viteză ale lichidului endolimfatic.

Deplasarea cupulelor crestelor ampulare, datorită circulației lichidului endolimfatic, reprezintă excitantul fiziologic de bază al dispozitivelor giratorii amintite. Rezultă că numai mișcările capului, în care există accelerații, reprezintă excitanți vestibulari.

Semnalele din nervii vestibulari depind de intensitatea devierii cupulelor, deci de acceleraţia mișcării lichidului endolimfatic în canalele semicirculare, frecvența lor fiind suportul informației.

Dispoziția spațială a celor trei perechi de canale permite discriminarea atît a axei de rotație, cît și a sensului rotației capului în spațiu.

Fibrele vestibulare aferente descarcă și în condiții de repaus, avînd un fond de activitate care definește nivelul lor de zero (Gernandt). Acest „bombardament" de repaus întreține o activitate de fond a centrilor rotatori, chiar în condiții de imobilitate a capului, ceea ce explică de ce

Scanned with OKEN Scanner

rotațiile posturale pot apărea fie prin creșterea nivelului de excitație a unui centru, fie prin scăderea nivelului de excitație a centrului complimentar. Rezultă că mărimea care acționează asupra aparatului efector medular este diferența dintre stările de excitație a centrilor complimentari ai fiecărei axe de rotație.

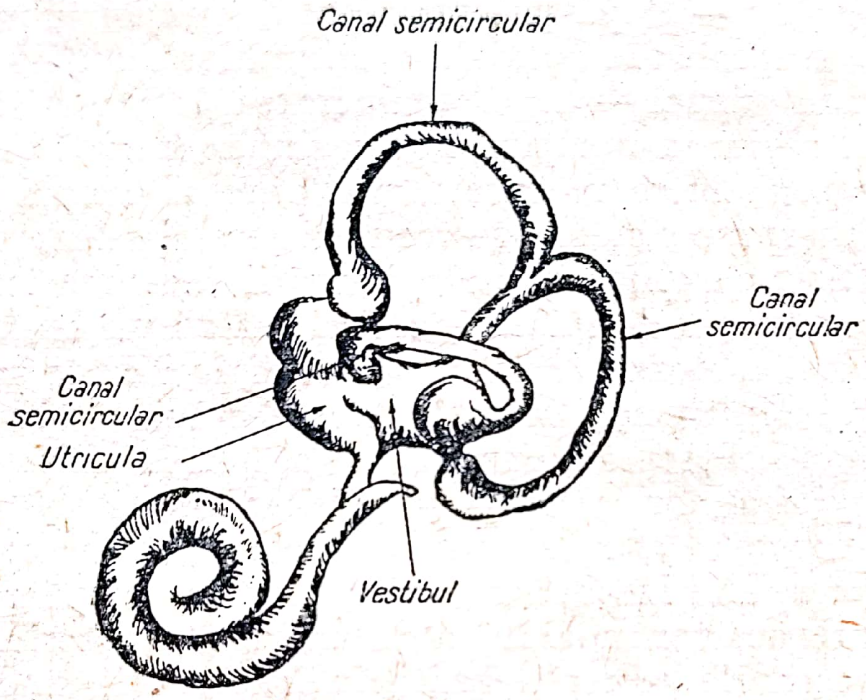


Fig. 9,10. Labirintul cu canalele semicirculare

Între aferențele vestibulare de la crestele ampulare și cei șase centri rotatori se află o distribuție logică de conexiuni, care ține seama atît de creasta ampulară de la care pleacă aferența, cît și de frecvența impulsurilor. Existînd o frecvență de repaus, din frecvența de descărcare la un moment dat se deduce nu numai intensitatea excitației, ci și sensul în care s-a produs rotația.

Între aparatul labirintic periferic și centrii giratori mezencefalici este plasat un sistem de recunoaștere a axei, direcției și accelerației mișcării. Acest sistem selectează logic excitarea sau inhibarea gradată a unuia sau mai multor centri giratori.

Numai ținînd seama de toate aceste particularități se poate înțelege complexitatea reacțiilor labirintice provo-

cate fie prin excitare, fie prin distrugerea canalelor semicirculare.

Sistemele giratorii posturale din trunchiul cerebral servesc drept cale finală comună şi altor sisteme aferente: le putem socoti drept executoarele unor subprograme posturale care pot fi folosite în cadrul unor comportamente motorii mai complexe. Ele primesc conexiuni şi de la sistemul auditiv — după prelucrarea informaţiei în sistemele pontine de localizare spaţială a stimulilor auditivi — şi de la sistemul vizual — după prelucrarea informaţiei optice în retină regiunea accipitală şi regiunea tectală. În toate aceste cazuri, între receptorii periferici şi centrii rotatori se află interpuse sisteme de recunoaştere şi selectare a formelor. Pentru explicarea complexităţii fenomenelor observate în acest gen de mişcări, trebuie să ţinem seama şi de acţiunea sistemelor de comandă giratorii, localizate în scoarţa cerebrală şi în nucleii de la baza creierului.

4. Reacţii posturale proprii primatelor. Motilitatea complexă a primatelor, apariţia mişcărilor lor de agăţare, eliberarea treptată a membrelor toracice de sarcina de susţinere a trupului implică organizarea unor adaptări posturale proprii acestor modalităţi de activitate motorie. Aceste reacţii posturale se realizează prin intervenţia unor reţele neuronale dispuse la nivelul supramezencefalic. De aceea, ele nu se relevă experimental decît la primatul thalamic, respectiv căruia i s-a distrus scoarţa cerebrală şi cea mai mare parte a corpului striat.

a. Culcarea animalului pe o latură determină contracţia posturală în extensie a membrelor de partea pe care este culcat şi în flexie a membrelor controlaterale. Mărimea care declanşează acest efect postural este reprezentată de excitarea asimetrică exteroceptivă (tactilă) a pielii de pe feţele laterale ale corpului (Bieber şi Fulton). Excitaţiile cutanate sînt recepţionate şi comparate pentru cele două jumătăţi (dreaptă şi stîngă). În funcţie de diferenţa detectată se declanşează efectul postural, prin intermediul formaţiunii reticulate, utilizînd acelaşi sistem descendent ca şi în cazul reflexelor tonice cervicale. Este un exemplu de utilizare a aceloraşi subprograme de către două sis-

Scanned with OKEN Scanner

teme diferite de recepție, recunoaștere și selectare a semnalelor.

b. Răsfirarea sau extensia pasivă a degetelor membrului toracic și uneori a membrului pelvin (excitație proprioceptivă) determină în membrul respectiv o reacție tonică de triplă flexiune și, în special, o flexiune persistentă a degetelor: este reflexul de apucare sau prehensiune forțată (Fulton și Dow). Acesta se realizează prin utilizarea programului reflexului de flexiune medulară de către rețeaua nervoasă supramezencefalică a primatelor, probabil ca un mecanism postural necesar agățării și mai tîrziu prehensiunii propriu-zise. Ca orice reacție posturală de flexiune, ea este în competiție cu reacțiile posturale de extensie.

5. Controlul cortical al reacțiilor posturale. Reacțiile posturale analizate anterior sînt efecte motorii ale unor dispozitive automate etajate, care utilizează toate drept ieșiri unități motorii. Aceste reacții constituie fondul statocinetic căruia i se suprapun efectele motorii mai complexe ale mișcărilor propriu-zise ce definesc comportamentul motor (așa-numita telecinezie).

Pentru a putea constitui punctul de plecare (nivelul de zero) și pentru a putea efectua corecțiile posturale necesare în cursul efectelor motorii telecinetice, reacțiile posturale trebuie să fie corelate între ele. Această operație de armonizare a efectelor posturale o realizează în special cerebelul. Ele trebuie să fie controlate (modulate) de instanța supremă a sistemului nervos, acolo unde se elaborează telecinezia.

Se știe că la vertebratele inferioare, această instanță supremă este reprezentată de tectul optic și de un sistem thalamo-entopenduncular (pallidal) primordial. La reptile și păsări, instanța supremă este reprezentată de sistemul thalamo-striat. Cunoaștem prea puțin despre neurofiziologia acestor formațiuni, în cazul submamiferelor, pentru a putea analiza modul în care se realizează la ele funcțiile telecinetice și controlul reacțiilor posturale.

La mamifere, instanța supremă este reprezentată de cortexul cerebral, al cărui rol devine mai important

Scanned with OKEN Scanner

la primate și în special la om. Intervenția cortexului cerebral în activitatea posturală se face prin două mecanisme.

a. Activitatea cortexului cerebral impune tuturor sistemelor posturale — de la reflexul miotatic pînă la reflexul de prehensiune — un nivel de funcționare foarte redus. În mod practic, majoritatea acestor reacții posturale nici nu pot fi evidențiate clar decît după decorticare, care le exacerbează prin întreruperea sistemelor inhibitorii descendente corticospinale, dar mai ales a celor cortico-(strio-) reticulate.

b. Scoarța cerebrală intervine direct în postură prin realizarea unor reacții mai nuanțate, la declanșarea cărora se adaugă excitațiilor proprioceptive și excitații exteroceptive-tactile, vizuale, auditive, olfactive, gustative.

La patrupede, cortexul cerebral realizează mai multe funcțiuni:

— Reacțiile de așezare. La vederea unui plan de susținere sau la atingerea cu talpa, cu dosul labei, cu botul sau cu fața ventrală a toracelui a unui plan de susținere se declanșează automat poziția normală a membrelor, pentru realizarea ortostatismului pe planul respectiv.

— Reacțiile de sărire adaptează postura unui membru susținător atunci cînd deplasările pasive ale corpului în plan orizontal antrenează o anumită deplasare a centrului de greutate. Aceste reacții asigură o schimbare a punctului de susținere.

— La primate, cortexul cerebral nuanțează (modulează) reflexul de prehensiune forțată. Declanșarea lui prin excitații proprioceptive este inhibată, conform unui principiu general; în schimb, prin excitarea tactilă a pielii palmei și feței palmare a degetelor se realizează reflexul de prehensiune exteroceptivă. Prin vederea unui obiect se realizează reflexul de urmărire. Este un alt exemplu de folosire a unui subprogram efector de diferite sisteme de recepție — recunoaștere — selecție.

La om, în condiții normale, aceste programe posturale fixe sînt și ele inhibate de cortexul frontal. Ele nu se evidențiază decît la copii (în perioada în care cortexul ce-

Scanned with OKEN Scanner

rebral nu este încă organizat) și în cazuri patologice (de exemplu, în tumorile frontale).

IX, *6. Reacțiile de redresare.* Reacțiile posturale realizate fie la nivelul măduvei, fie la nivelul cortexului, descrise anterior, se comportă ca un efect motor, stereotip ca formă, eventual gradat ca intensitate, provocat de un anumit excitant sau de o anumită combinație de excitanți. Principiul de bază al declanșării acestor reacții este recepționarea semnalelor, recunoașterea lor și selectarea unui răspuns conform unor programe fixe.

Reacțiile de redresare au la bază un principiu de funcționare mai complex. Ele implică executarea unei mișcări — în general a unei secvențe de mișcări (deplasarea capului, a membrelor sau a trunchiului) — pînă la realizarea unei anumite poziții finale în spațiu, indiferent de poziția inițială a elementelor corporale respective unele față de altele sau de poziția lor în cîmpul gravitațional terestru.

Cu alte cuvinte, unitățile motorii ale diferiților mușchi sînt activate în vederea realizării unui anumit scop final. Acest scop este: așezarea capului astfel încît axele sale fronto-occipitală și bitemporală să fie în plan orizontal, adică perpendicular pe cîmpul gravitațional terestru. Urmează apoi dispunerea trunchiului și a membrelor în poziție fiziologică în raport cu capul. Este vorba deci de un dispozitiv care asigură homeostaza spațială.

Aceasta implică existența în memoria rețelei nervoase a unui model al poziției normale de referință. Mesajele aferente, venite de la receptori, realizează în fiecare moment modelul real al poziției corpului și al componentelor sale. În rețea se compară modelul existent la un anumit moment cu modelul de referință, iar comanda de execuție urmărește reducerea pînă la anulare a diferențelor existente între cele două modele.

Reacțiile de redresare determină doar subprogramele ce vor fi selectate în cadrul strategiei care conduce la realizarea situației finale.

Deci, reacțiile de redresare duc la plasarea fiziologică a organismului în spațiul terestru și ele nu pot fi realizate

Scanned with OKEN Scanner

decît cu participarea etajelor suprapontine ale sistemului nervos. La subprimate ele se realizează la nivelul mezencefalic sau mezencefalo-diencefalic (cu participarea paleotalamusului, a nucleului entopeduncular și a formațiunilor extrapiramidale subthalamice). La mamiferele subprimate se adaugă — pentru redresarea optică — activitatea cortexului occipital, care acționează asupra sistemelor de redresare prin conexiunile occipito-tectale. La primate, datorită verticalizării, redresarea implică un proces mult mai complex, care nu mai poate fi realizat doar de sistemele mezencefalo-diencefalice. La primate, reacțiile de redresare nu se pot executa în lipsa scoarței cerebrale: primatul decorticat nu se ridică, nu se menține în ortostatism și, evident, nu merge.

1. Reflexul de redresare a capului. Prima etapă a procesului de redresare este așezarea capului în poziția lui standard, în raport cu cîmpul gravitațional terestru. Elementele executorii sînt în principal mușchii cervicali. Unitățile motorii ale acestor mușchi reprezintă elementul automat al redresării capului. Elementul de măsurare care detectează eroarea de poziție se află la nivelul a trei analizatori.

a. La nivelul aparatului otolitic al labirintului. În acest caz, deplasarea capului se face prin rotații în jurul axelor bitemporală și fronto-occipitală, pînă ce se egalizează frecvențele impulsurilor aferente de la maculele ambelor labirinte. Este vorba de reflexul de redresare a labirintului asupra capului — mecanism fundamental de redresare a capului.

b. La nivelul zonei exteroceptive a pielii de pe fețele laterale ale corpului. În acest caz, deplasarea capului în jurul axelor menționate se face în funcție de asimetria impulsurilor care vin de la fețele laterale ale corpului: sînt reflexe de redresare a capului sub influența trunchiului. Ele apar atunci cînd animalul este ținut pe o față laterală (decubit lateral).

c. La nivelul retinei. Rotațiile de redresare a capului se fac pînă ce imaginea de pe ambele retine ocupă o anumită poziție în cadrul unui sistem de referință spațială mai

Scanned with OKEN Scanner

complex. Reperele vizuale ale acestui sistem trebuie să fie orientate, participînd în principal linia orizontului şi anumite elemente verticale. Dacă sistemul de referinţă este relativ simplu şi probabil înnăscut în cazul reflexelor de redresare labirintice şi ale influenţelor corpului asupra capului, din contra, în cazul reflexelor de redresare optică, sistemul de referinţă este complicat şi probabil că se structurează ontogenetic, în funcţie de condiţiile ecologice ale fiecărui individ.

Elaborarea criteriului de referinţă, calcularea erorii de poziţie şi stabilirea comenzii către muşchii cefalogiri implică operaţii complexe, care nu se pot realiza decît în structuri nervoase complexe. La vertebrate, reflexele de redresare optică se realizează după prelucrarea semnalelor venite de la retină în regiunea tectală, unde există o proiecţie topologică a retinelor şi a cîmpurilor lor receptoare. Această situaţie intervine pînă la mamifere. La mamifere, dispozitivul de prelucrare a informaţiei vizuale, care asigură redresarea optică, nu se mai află la nivelul regiunii tectale, ci la nivelul regiunii occipitale a scoarţei cerebrale, unde există o riguroasă reprezentare topologică a retinelor.

2. Reflexul de redresare a trunchiului sub influenţa capului. În reţeaua neuronală din regiunile mezencefalică şi diencefalică există un dispozitiv de stabilire a poziţiei jumătăţii toracice anterioare a corpului în raport cu poziţia capului. Elementele executoare sînt muşchii membrelor toracice şi ai jgheaburilor vertebrale. Ei ajustează poziţia jumătăţii toracice a corpului în raport cu capul şi determină începutul redresării corpului. Elementul de măsurare este constituit de proprioceptorii muşchilor cervicali. Ceea ce se urmăreşte este egalizarea frecvenţei impulsurilor aferente proprioceptive cervicale de la grupurile de muşchi antagonişti.

3. Reflexul de redresare a corpului sub influenţa corpului. Tot datorită reţelelor neuronale mezencefalice şi diencefalice se produce şi stabilizarea poziţiei jumătăţii pelvine a corpului faţă de cea toracică. Acest reflex de redresare sfîrşeşte prin a aduce întregul animal în poziţia sa normală de stat în picioare, poziţie care, ulterior, este men-

Scanned with OKEN Scanner

ţinută prin reflexele posturale amintite. Evident, redresarea corpului în raport cu capul este cu mult mai complexă la bipede, în comparaţie cu patrupedele.

Un exemplu demonstrativ asupra modului cum cooperează diferitele reflexe de redresare este dat de modul cum cade o pisică după ce a fost aruncată în aer (Rademaker).

O pisică aruncată în aer îşi stabilizează în primul rînd poziţia capului — prin reflexele de redresare — apoi îşi stabilizează jumătatea toracică a corpului şi, în fine, jumătatea pelvină. Într-a doua etapă intervin reacţiile labirintice de cădere verticală care pregătesc muşchiulatura membrelor şi trunchiului pentru luarea de contact cu solul şi, în fine, intervin mecanismele posturale antigravitice pentru menţinerea pisicii în picioare.

Reflexele enumerate anterior nu epuizează toate programele motorii fixe. În afară de motilitatea care are drept scop deplasarea animalului, există şi alte acte motorii necesare existenţei, acte comandate de reţele neuronale. Astfel, în regiunea bulbară se află reţelele neuronale care asigură realizarea deglutiţiei şi a vomei; în regiunea bulbopontopedunculară se află reţelele care asigură automatismul respirator; în regiunea subthalamoepithalamică se află reţelele care determină strănutul etc.

Un dispozitiv automat particular este constituit de sistemul neuronal care asigură motilitatea globilor oculari; acest sistem ridică probleme de neurocibernetică extrem de interesante.

Fundamentală este şi reţeaua neuronală care asigură deplasarea animalului în spaţiu. La vertebratele terestre, deplasarea este asigurată de regiunea nucleilor de la bază. La primate intervine cortexul care domină întregul proces, astfel că la ele mersul — ca şi staţionarea în picioare — se pot realiza numai pe baza circulaţiei informaţiei şi la nivelul scoarţei cerebrale.

Aceste probleme nu vor fi însă examinate în prezenta lucrare.

Ideile fundamentale care trebuie reţinute sînt următoarele: filogenetic, se constată o complicare a sistemului

Scanned with OKEN Scanner

nervos, prin suprapunerea unor sisteme adaptive din ce în ce mai complicate. În timp ce la animalele simple sîntem în prezența unor sisteme nervoase rudimentare (de tipul rețelelor paucineuronale) capabile doar de o activitate automată extrem de simplă, la mamifere apare rolul scoarței. El devine dominant la antropoide, iar la om actele automate se desfășoară de cele mai multe ori sub controlul decisiv al scoarței cerebrale.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul X

ACTIVITATEA MOTORIE COMPLEXĂ

X, *1. Comportamentul înnăscut (instinctele).* 1. După cum s-a arătat în capitolele precedente, cea mai elementară schemă logică a unui act motor oarecare — simplu sau complex — poate fi reprezentat ca în figura 10,1. În această schemă, *i* reprezintă mesajele de intrare, iar *e* semnalele de ieşire din sistem. Legătura sistemului cu exteriorul se face prin blocul de intrare *I*, care reprezintă de fapt receptorii. Aceştia transmit semnale la blocul *SN* — ce reprezintă sistemul nervos — care, la rîndul său, acţionează asupra unităţilor motorii *UM*. Prin blocul de aferentaţie inversă *AI*, se readuce la intrare o informaţie privind efectele produse. Această schemă logică este valabilă din punct de vedere informaţional, atît pentru reflexul elementar — de exemplu reflexul miotatic —, cît şi pentru comportamentul uman inteligent.

2. Unele manifestări motorii sînt relativ simple, ca reflexul miotatic, reflexele de flexiune (nociceptive) sau de susţinere locale, reflexul de păşire, reflexul de scărpinare. După cum s-a arătat, la baza lor stă o prelucrare relativ simplă a informaţiilor aferente, prelucrare care poate fi realizată în reţelele paucineuronale de la nivelul măduvei.

Se constată însă că, chiar şi la acest nivel, reţeaua neuronală dispune de mai multe variante de mişcări posibile (extensie, flexie), dintre care alege, pe baza unei discriminări, una dintre aceste variante. Aceasta presupune existenţa mai multor blocuri în schema modelului sistemului ce reprezintă activitatea motorie respectivă. O schemă posibilă este redată în figura 10,2. În blocul *SN* corespunzător sistemului nervos trebuie să se evidenţieze un bloc *R*, care cuprinde dispozitivele de recunoaştere a anumitor

Scanned with OKEN Scanner

stimuli, ca și dispozitivul S în care se stochează diferitele variante de mișcări posibile. Între aceste două blocuri se dispune elementul A (un selector logic), care alege o anumită variantă de mișcare posibilă.

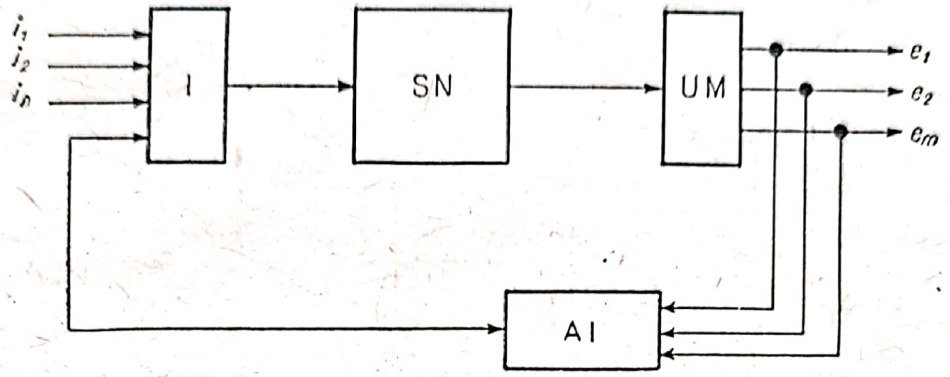


Fig. 10,1. Schema logică a unui act motor oarecare

$i_{1, 2, n}$ – intrări; $e_{1, 2, m}$ – ieșiri; **I** – receptori; **SN** – sistem nervos; **UM** – unități motorii; **AI** – aferentație inversă

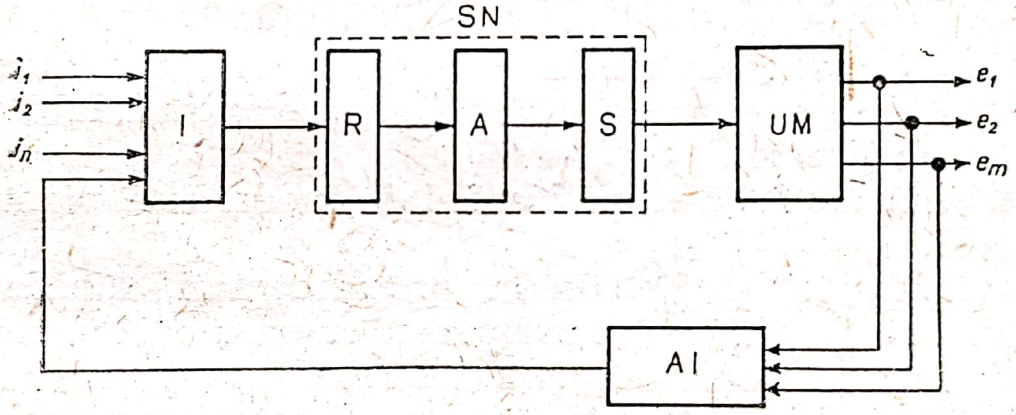


Fig. 10,2. Schema logică a unui act motor mai complex

R – dispozitiv de recunoaștere; **S** – stoc de variante de mișcări; **A** – selector logic; (în rest ca în fig. 10,1)

Reflexele tonice cervicale și labirintice, reflexele de susținere segmentară se înscriu în același tip de organizare, cu diferența că ele implică configurații de excitații motorii mai complexe.

3. Un nivel superior al motilității este reprezentat de ansamblul reacțiilor de redresare a organismului care realizează ceea ce s-ar putea numi o homeostazie motorie,

Scanned with OKEN Scanner

posturală. Ele duc în final la realizarea unei poziții standard a diferitelor segmente corporale unele față de celelalte și a întregului organism față de cîmpul gravitațional terestru. Ele fac să intervină un principiu nou de funcționare, implicînd activarea anumitor efecte motorii, care

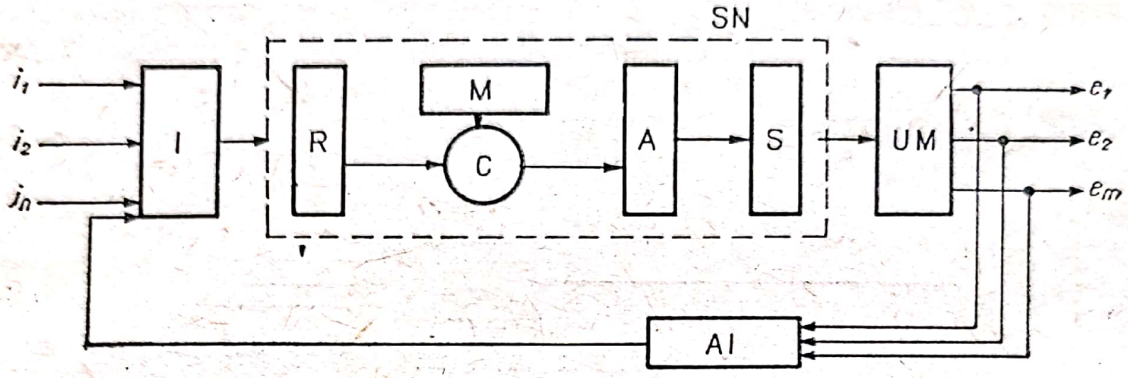


Fig. 10,3. Schema logică a unui act motor finalizat

M – Memorie; **C** – Comparator; (în rest ca în fig. 10,1 și 10,2)

trebuie să reducă la minim diferența dintre poziția reală a corpului și a segmentelor sale și poziția standard care trebuie realizată.

Schema posibilă a unui astfel de model este redată în figura 10,3.

Informațiile venite de la proprioceptori, labirint și eventual de la retine sînt comparate cu un model neuronal, înscris într-un sistem de memorie, model al poziției standard care trebuie realizată. Acțiunea motorie este comandată pentru a anula diferența ce rezultă din această comparație. Pentru realizarea acestei confruntări, sistemul nervos trebuie să dispună de o memorie *M* în care se stochează poziția standard și un comparator *C*, care compară această poziție standard cu poziția reală, așa cum este ea dată de sistemul de recunoaștere.

4. Următorul nivel al motilității se află în domeniul ethologiei, la frontiera dintre fiziologie și psihologie, și se referă la comportamentele instinctuale. Analiza datelor de fiziologie și de zoopsihologie permite elaborarea unei scheme logice a acestor comportamente.

Scanned with OKEN Scanner

Orice comportament instinctual este reprezentat de o succesiune de acte motorii bine determinate, declanşate de un anumit stimul. Aceasta implică desfăşurarea unui program riguros. Se poate afirma că, în general, fiecare comportament instinctual rezultă din aplicarea unei succesiuni de subprograme, fiecare reprezentînd o combinaţie de acte motorii mai mult sau mai puţin elementare, simultane şi succesive. Studiul comportamentului instinctual pune în evidenţă existenţa unor astfel de programe care, chiar şi la animalele inferioare — de exemplu la insecte—, sînt uneori extrem de complicate.

Să luăm exemplul scarabeului care, atunci cînd trebuie să-şi depună ouăle, pentru a le asigura acestora condiţii optime de umezeală şi de temperatură strînge băligar, realizînd din el o sferă cu suprafaţa foarte netedă. Se ştie că sfera are proprietatea de a reprezenta un volum maxim pentru o suprafaţă dată sau, invers spus, o suprafaţă minimă pentru un volum dat. În modul acesta se obţine o evaporare minimă a apei şi o pierdere minimă de căldură, tocmai pentru a se asigura condiţiile necesare de dezvoltare a ouălor. Scarabeul transportă sfera într-un loc adăpostit şi construieşte în centrul ei un mic spaţiu aerat, în interiorul căruia îşi depune oul. Astfel larva va găsi adăpost şi hrană.

Mai complicat este programul insectelor paralizante, ca osmia, cerceris etc. Cînd acestea trebuie să-şi depună ouăle, ele intră în agitaţie şi caută un anumit tip de plantă. Apoi caută sub coaja trunchiului plantei respective o anumită specie de omizi. Atunci cînd întîlnesc omida, îi distrug electiv ganglionii nervoşi, astfel încît o paralizează, fără însă a o omorî. Insectele îşi depun apoi ouăle în corpul omizii paralizate. Larvele vor găsi astfel adăpost şi hrană proaspătă. Se înţelege cu uşurinţă că pentru realizarea programului total intră în acţiune numeroase subprograme parţiale. Se pare că recunoaşterea ganglionilor, de fapt, este un rezultat subsidiar, înţeparea lor rezultînd din potrivirea anumitor dimensiuni geometrice : insecta prinde omida în anumite puncte şi atunci, în mod automat, înţeapă larva în ganglionii respectivi.

Scanned with OKEN Scanner

Tot programe fixe, dar complicate, se observă în comportamentul instinctual constructiv la viespi sau albine, care construiesc faguri după canoane date.

La fel, păianjenul își țese pînza după o lege fixă, firul fiind întins după o spirală logaritmică.

Zoopsihologia pune în evidență existența la o aceeași ființă a mai multor programe de comportamente instinctuale, fiecare program avînd în structura sa mai multe variante de acțiuni elementare realizabile.

Se știe că un program complex poate fi descris cu ajutorul unor *operatori*. Efectele motorii — simple sau complexe — pot fi considerate drept rezultat al intervenției unui operator sau a mai mulți operatori, ceea ce exprimă prelucrarea de către rețeaua neuronală a mesajelor de intrare.

În cazul comportamentelor instinctuale intervin *anumiți* operatori care sînt selectați în mod special. Mai mult, în cursul desfășurării comportamentului, rezultatele activității motorii sînt analizate în anumite etape. În funcție de rezultatul obținut se selectează diferite variante de subprograme care se aplică în continuare, în funcție de realizarea anumitor *condiții logice*. În modul acesta, fiecare comportament înnăscut are la bază un algoritm determinat genetic, în care sînt înscriși toți operatorii care pot fi selectați, ordinea în care trebuie să intervină aceștia, ca și condițiile logice de declanșare a întregului program și apoi de selectare a diferitelor variante de subprograme. Informația transmisă genetic și care asigură comportamentele înnăscute trebuie să fie înscrisă în sistemul nervos sub forma unui model neuronal complex, care să cuprindă toate datele enumerate mai sus.

Precizia și stereotipia desfășurării comportamentelor înnăscute se explică prin aceea că succesiunea de acte motorii care le realizează este determinată de informația genetică, ce prestabilește condițiile logice după care este prelucrată informația provenită prin receptori din mediul extern sau intern.

Existența programelor ridică două probleme majore și anume: modalitatea de stocare și modul de elaborare a lor.

Scanned with OKEN Scanner

a. Fiziologia nu a elucidat încă mecanismul memoriei structurale (de lungă durată). Este foarte probabil că baza programelor respective trebuie căutată atît la nivelul structurii reţelelor neuronale (distribuţia sinapselor şi a pragurilor respective, topologia conexiunilor), cît şi la nivelul structurii moleculare a unor constituenţi neuronali (ADN, ARN). Trebuie remarcat că programe comportamentale uneori foarte complexe sînt stocate în sisteme nervoase relativ simple, ca acelea ale nevertebratelor.

În general, se admite (Chauchard) că la vertebrate, stocajul şi activarea programelor de comportamente instinctuale se face la nivelul nucleilor de la bază (thalamus, hipothalamus, corp striat, formaţiuni subthalamice, amigdală). Se ştie că mamiferele subprimate decorticate experimental îşi păstrează comportamentele instinctuale de bază, pe care aceleaşi animale decerebrate nu le mai au.

Comportamentele instinctuale ale submamiferelor şi în special ale păsărilor (schemele comportamentelor înnăscute ale lui Lorenz) sînt posibile datorită nucleilor bazali. Aceste clase de vertebrate nu au cortex cerebral (Kallischer, Rogers). De asemenea, excitarea formaţiunilor diencefalice şi a celor de la frontiera diencefalo-telencefalică (în special în sistemul limbic) produce reacţii motorii de tipul celor care intră în structura dinamică a subprogramelor comportamentale.

Ansamblul nucleilor de la bază — cu formaţiunile lor nucleare multiple şi cu circuitele neuronale bogate care le definesc — acţionează organizat asupra unităţilor motorii, prin conexiuni descendente ce-şi au originea în elementele eferente ale sistemului extrapiramidal. La mamifere, acestea se află în nucleul palidal intern (entopeduncular), corpul subthalamic al lui Luys, locus niger şi nucleul roşu. Conexiunile coboară în special prin fasciculul central al calotei, fasciculul rubrospinal, fibrele nigroreticulate. Majoritatea lor acţionează prin intermediul fibrelor reticulate atît asupra sistemului motoneuronilor alfa, cît şi a celor gamma. În acest fel, nucleii de la bază, suprapuşi sistemelor mezencefalice, pot declanşa grupele de mişcări elementare, care intră în structura dinamică a comportamentelor instinctuale.

Scanned with OKEN Scanner

b. Toate programele comportamentelor instinctuale sînt înnăscute. Ele rezultă din procesul de organogeneză cerebrală, pe baza informației ereditare. Nu se cunoaște încă modul în care informația, înscrisă în mesajele genetice, se obiectivează în cursul organogenezei în general și, cu atît mai puțin, în structura dinamică ce asigură realizarea programelor comportamentale amintite. Nu se cunoaște nici modul în care se elaborează programele respective în cursul filogenezei. Această bioinvenție funcțională trebuie considerată pe același plan ca și bioinvenția structurală, care duce la geneza formațiunilor anatomice. Ambele rezultă din mecanismul de evoluție a speciilor și are la bază atît jocul mutațiilor, care generează noi variante, cît și factorii de mediu, care selectează variantele cele mai adaptate.

5. Declanșarea unui program și selectarea variantelor succesive de subprograme se face pe baza realizării unor condiții logice, privind informațiile aferente sosite de la receptori.

Se disting trei categorii de informații.

a. O primă categorie este reprezentată de informațiile care *sensibilizează selectiv* un anumit program. Fenomenul pare a fi o facilitare, în sensul coborîrii pragului de excitabilitate a modelului neuronal corespunzînd întregului program. De exemplu, programul care stă la baza comportamentului instinctual alimentar este sensibilizat de o scădere în sînge a concentrației unor substanțe, de exemplu a glucozei.

În general, factorii biochimici din mediul intern sensibilizează diferitele programe.

Neurofiziologia modernă a pus în evidență existența la nivelul hipothalamusului a unor celule nervoase sensibile la concentrația unor substanțe. Se poate vorbi astfel de receptori glicostatici, care detectează variațiile glicemiei (Mayer), de osmoreceptori — care măsoară presiunea osmotică a sîngelui (Verney), de receptori specializați pentru anumite substanțe hormonale, ca hormonii steroizi ai glandei corticosuprarenale sau hormonii sexuali. În acest sens, sînt extrem de interesante experimentele de activare a

Scanned with OKEN Scanner

comportamentului sexual, prin aplicarea de hormoni sexuali, pe regiunea preoptică a hipothalamusului sau activarea comportamentului matern prin aplicarea acelorași hormoni pe regiunea hipothalamică anterioară (Beach).

Este foarte probabil că hipothalamusul nu intervine numai ca o structură de detectare care traduce anumite variații biochimice ale mediului intern în semnale nervoase, ci și execută o serie de operații asupra acestor semnale. Aceasta este concluzia generală care se degajă atît din experimentele de stimulare cu electrozi foarte fini, cît și de distrugeri bine localizate.

De exemplu, lezarea regiunii nucleului ventromedial al hipothalamusului declanșează o polifagie, animalul respectiv mîncînd tot timpul și foarte mult. Lezarea nucleului lateral al hipothalamusului produce, din contra, un comportament de saturație. Stimularea unei regiuni situată imediat lateral față de nucleul paraventricular produce o sete anormală, ca și distrugerea nucleilor supraoptici, care generează un diabet insipid.

În funcție de semnalele primite de la receptorii specializați amintiți și, pe baza acestor semnale, hipothalamusul acționează fie facilitînd, fie inhibînd structurile în care se află înscris programul comportamentului corespunzător. Din cele expuse, sîntem înclinați să credem că aceste structuri sînt dispuse în hipothalamus și în nucleii de la bază.

Informația care sensibilizează un anumit program corespunde unei trebuințe a organismului respectiv și ea stă la baza motivației biologice. Totdeauna este vorba de trebuința unui obiect (a hranei, a apei etc.) sau de o trebuință funcțională de exemplu de mișcare etc.

Informația sensibilizatoare nu declanșează programul, ci scade doar pragul de excitabilitate al modelului neuronal care conține acest program. Uneori generează o activitate motorie de căutare — de obicei neregulată, cu mișcări aleatorii — o stare apetitivă, care nu are nimic specific pentru programul respectiv. Această stare apare în cazul vertebratelor printr-o activare difuză — prin formațiunea reticulată — a sistemului nucleilor de la bază.

Scanned with OKEN Scanner

b. O a doua categorie de informaţii este reprezentată de excitanţii specifici configuraţionali, care pot fi recunoscuţi ca atare şi care declanşează programul sau care intervin pe parcurs, semnalizînd diferite situaţii corespunzătoare condiţiilor logice de desfăşurare a programului respectiv. Aceste informaţii se numesc *semnale evocatoare* şi

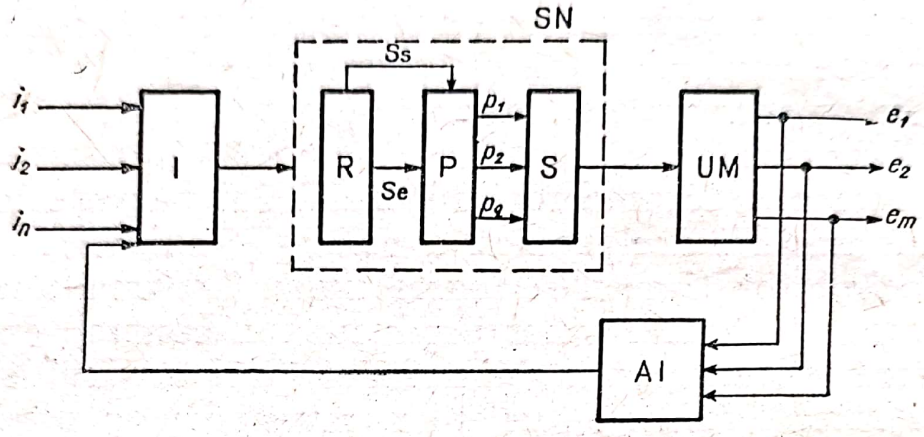


Fig. 10,4. Schema logică a unui comportament înnăscut
P – Stoc de programe; $P_{1,2,q}$ – programe selectate; S_s – semnal sensibilizator; S_e – semnal evocator (în rest ca în fig. precedente)

reprezintă impulsul care determină succesiunea de acte motorii ale comportamentului respectiv. Ele permit satisfacerea trebuinţei printr-o acţiune finalizată, datorită informaţiei genetice conţinută în algoritmul respectiv. Ca şi în reflexele de redresare, activitatea motorie îşi atinge automat ţelul, prin compararea realităţii detectate de receptori cu anumite modele, situate în memoria de lungă durată a sistemului nervos. Schema logică de circulaţie a informaţiei în cadrul comportamentelor înnăscute poate fi aproximată ca în figura 10,4. Spre deosebire de schemele din figurile precedente din acest capitol, s-a pus în evidenţă stocul P de programe, stimulul sensibilizator S_s, stimulul evocator S_e, ca şi programele p_i care sînt selectate. S reprezintă sistemul de activare al subprogramelor.

Semnalul evocator (Lorenz, Tinbergen) are de obicei o configuraţie simplă, pe care reţeaua nervoasă o detaşează din fluxul mesajelor ce vin de la receptori. După ce este identificat, acest semnal declanşează sau nu programul

instinctual, după cum programul respectiv este în prealabil activat sau nu de semnalul motivațional.

În general, condiția logică a realizării programului este dată de semnalul sensibilizator sau *motivațional*, care facilitează desfășurarea sa și la care se adaugă primul semnal evocator al programului care declanșează comportamentul. Semnalele evocatoare foarte puternice pot declanșa singure comportamentul, chiar în lipsa semnalului motivațional.

În general, un semnal motivațional, chiar foarte puternic, nu declanșează comportamentul instinctual, ci numai o stare de agitație motorie nespecifică, de neliniște — o *stare apetitivă* amplificată.

S-a demonstrat experimental că fiecare etapă, deci fiecare subprogram al comportamentelor instinctuale complexe, se declanșează sub acțiunea unui semnal evocator. Ethologia modernă a subliniat simplitatea, uneori extrem de mare, a configurației acestor semnale evocatoare. De exemplu, fluturele mascul recunoaște femela numai după mirosul ei. Deci, semnalul evocator al comportamentului sexual al fluturelui este reprezentat de un semnal olfactiv. Femelele unor specii de insecte au drept semnal evocator al comportamentului sexual doar un semnal sonor, generat de mascul. În aceste comportamente, restul semnalelor (vizuale, tactile etc.) nu au nici un rol.

Semnalul evocator al comportamentului de alimentare al puiului de goeland este reprezentat de o pată colorată de pe ciocul mamei ; semnalul evocator al comportamentului de apărare a păsărilor mici față de păsările de pradă este reprezentat de forma gîtului păsărilor de pradă (gît scurt) etc.

Datele de mai sus indică existența unor căi aferente specifice de la receptori și a unor structuri neuronale, capabile să detecteze forma (relativ simplă) a semnalului evocator, să o recunoască și, în funcție de indicii de recunoaștere, să activeze programul sau subprogramul corespunzător. Din cauza lipsei unor date experimentale suficiente, nu se știe încă nivelul la care se efectuează aceste operații la nevertebrate. În cazul vertebratelor, se știe că rolul principal revine thalamusului, pentru aferențele de la suprafața corpului și de la sistemul proprioceptorilor.

Scanned with OKEN Scanner

S-ar putea ca în acest sens, un anumit rol să revină și cerebelului, după cum tectul optic intervine pentru aferențele de la retină, iar rinencefalul propriu-zis pentru aferențele olfactive.

c. Ultima categorie de informație se referă la saturație, adică la informația care inactivează programul respectiv.

În cazul comportamentelor de consumare (foame, sete), saturarea ar putea fi provocată de revenirea la normal a concentrației sanguine. Totuși, comportamentul respectiv încetează în general după acumularea unei cantități de substanță în tubul digestiv, dar cu mult înainte de resorbția lor și deci de corectarea homeostaziei biochimice. Comportamentul de saturație precede deci eliminarea erorii cibernetice dintre model și realitate privind concentrația sanguină.

S-ar putea ca saturația să fie realizată prin semnale sosite de la mecanoreceptorii digestivi, care semnalizează distensia aparatului digestiv. Experimentele arată totuși că la animale cu fistulă gastrică sau esofagiană, la care nu se mai produce distensia aparatului digestiv, ingestia alimentelor la un moment dat se oprește. Această oprire are loc după ce a fost înghițită o anumită cantitate de alimente sau de lichide — care însă nu s-au acumulat în tubul digestiv, fiind eliminate prin fistulă. Rămîne deci posibilitatea ca însuși programul să comande desfășurarea în timp a comportamentului respectiv. După aplicarea un anumit timp a subprogramului referitor la consumarea alimentelor, se dă în mod automat semnalul de saturație.

Desfășurarea unui program depinde în primul rînd de intensitatea absolută a stimulului motivațional, în al doilea rînd de competiția dintre diferiți stimuli motivaționali. Conform acestui principiu, un comportament instinctual poate înceta în momentul în care o altă motivație mai puternică impune — prin activarea unui alt program — un alt comportament.

d. La cele trei categorii de informații amintite trebuie adăugate toate semnalele care traduc interferența unor factori perturbanți din mediul intern sau extern, ce împiedică mai mult sau mai puțin executarea programului com-

Scanned with OKEN Scanner

portamental. Factorii perturbanți pot fi extrem de variați, avînd rolul unor condiții logice negative în schema generală a programului respectiv.

Evident că atunci cînd este vorba de om motivația este mult mai complexă, dincolo de nivelul motivației biologice existînd nivelul motivației sociale, cu toată complexitatea sa. Societatea, în mijlocul căreia trăim, condiționează o serie de stimuli evocatori, de saturare etc., care modulează comportamentul uman. Factorul social adaugă componente noi programelor înnăscute, făcînd ca anumiți stimuli evocatori să conducă, în cazul omului educat, la altă comportare decît în cazul omului needucat.

X, 2. *Emoțiile.* Cele patru categorii de semnale amintite în subcapitolul precedent — semnalul care sensibilizează selectiv un anumit program, excitanții specifici care declanșează programul sau care intervin pe parcurs pentru ca să semnalizeze diferitele condiții logice ale desfășurării sale, semnalele de saturație și factorii perturbanți — intervin în structura algoritmului care definește programele instinctuale. Ele însă mai au și rolul de a schimba modul de activitate, regimul de funcționare a întregii rețele nervoase. Lucrurile se petrec ca și cînd întreaga rețea nervoasă ar putea lucra după patru regimuri sau modalități diferite, fiecare determinînd o atitudine anumită a animalului față de obiectele și fenomenele din jur. Aceste regimuri sau stări sînt echivalențele simplificate ale stărilor emoționale umane. Ca și acestea, sînt corelate de trebuințele animalului, sînt determinate de fenomenele reale detectate de receptori și determină la rîndul lor atitudinea față de aceste fenomene reale.

Pe plan pur fiziologic, fiecare din aceste stări emoționale se exprimă printr-o serie de modificări vegetative, afectînd ritmul cardiac, tensiunea arterială, ritmul respirator, funcționarea tubului digestiv etc. Aceasta presupune emisiunea unor semnale, atît nervoase, cît și hormonale. În general, este vorba fie de o mobilizare a rezervelor energetice ale organismului, care este astfel pus, în condiții optime, pentru a face față unei anumite situații,

Scanned with OKEN Scanner

fie, din contra, se urmărește o economisire maximă a acestor rezerve.

Stările emoționale sînt însoțite de anumite mișcări expresive, caracteristice, care depind de starea emoțională respectivă și de intensitatea ei, și care, evident, variază de la o specie la alta.

În cazul mamiferelor, informațiile care generează stările emoționale sînt prelucrate de către hipothalamus. Experiențele lui Hess au pus în evidență posibilitatea declanșării de reacții vegetative și de mișcări expresive, de tipul celor care se observă în diferitele stări emoționale ale animalelor

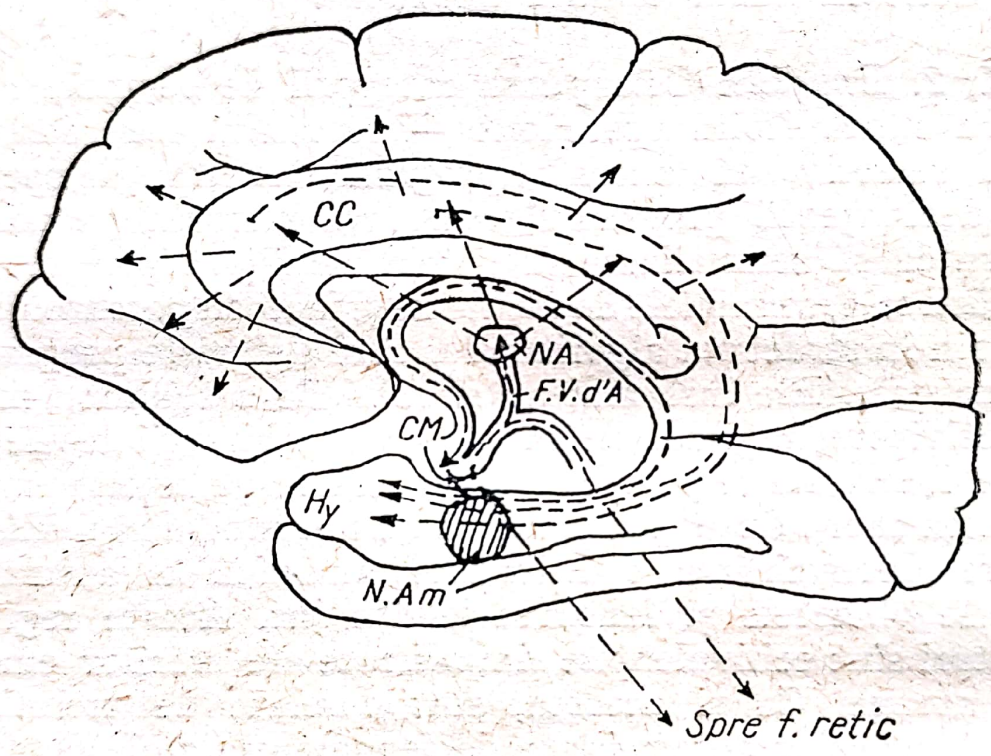


Fig. 10,5. Sistemul rinencefalic

CC – circumv. corpului calos; **NA** – nucl. anterior al thalamusului; **NAm** – nucl. amigdalian; **CM** – corp mamilar; **F.V.d'A** – fascicolul lui Vicq d'Azir

respective. Ulterior, s-a constatat că aceleași efecte se obțin și prin excitarea sau distrugerea unor porțiuni din scoarța cerebrală — așa-numita formațiune limbică a lui Broca, inclusiv nucleul amigdalian. Fiziologia contemporană consideră că stările emoționale sînt rezultatul prelucrării infor-

maţiilor aferente în hipothalamus şi în formaţiunea limbică împreună cu conexiunile lor reciproce (Papez), (cf. fig. 10,5). Acest dispozitiv complex neurofiziologic selectează anumite mesaje, acţionînd asupra centrilor vegetativi diencefalici, asupra formaţiunii reticulate, asupra complexului thalamostriat şi asupra scoarţei cerebrale.

Modul în care se realizează fiecare stare a reţelei nervoase nu a fost încă elucidat. Se poate admite că este vorba de facilitări şi inhibări selective a anumitor circuite neuronale corticale, corticosubcorticale şi subcorticale, care implică o redistribuţie temporară a valorilor de prag ale diferitelor populaţii neuronale. Se poate admite că în sistemul limbico-hipothalamic sau rinencefalic funcţionează tonalizatorii afectivi ipotetici ai lui Norbert Wiener.

a. Informaţiile motivaţionale sensibilizează specific un anumit program, generînd o trebuinţă care, pe plan comportamental, generează o atitudine de expectativă şi de căutare a semnalului evocator. Această atitudine se manifestă în general printr-o neliniște, care poate ajunge pînă la agitaţie motorie. Este vorba de latura expresivă a unei stări emoţionale care, la animal, reprezintă echivalentul stărilor umane de încordare şi de anxietate. La baza ei stă o activitate neselectivă a receptorilor, o mobilizare a activităţii energetice a organismului, paralel cu o activitate difuză a analizatorilor corticali.

Este foarte probabil că adesea se produce o activitate preponderentă a unora dintre analizatori. În cazul informaţiilor motivaţionale, care activează programul instinctului de conservare, starea de neliniște are o intensitate mai mare, agitaţia îmbracă un aspect mai particular: se poate spune că sîntem în prezenţa unei stări echivalente cu frica. În acest caz, în loc de a avea o activare a analizatorilor corticali, uneori avem o dezorganizare funcţională a acestora.

Informaţia de saturaţie duce, dimpotrivă, la o stare de liniştire, de reducere pînă la dispariţie a încordării. La animal se realizează o stare emoţională de destindere, care corespunde cu o inactivare a programelor de comportament instinctuale.

Scanned with OKEN Scanner

Totdeauna, activitatea animalului va tinde către realizarea unei stări de destindere — deci va urmări reducerea pînă la anulare a efectelor produse de excitanţii motivaţionali, ceea ce implică, în fond, executarea programului instinctual respectiv.

b. Informaţia evocatoare determină începutul executării programului pe care îl implică, dar totodată ea generează o stare care pe plan emoţional este echivalentul plăcerii, al bucuriei, al entuziasmului din psihologia umană. Realizarea condiţiei logice a declanşării unei etape a unui program este şi condiţia logică necesară pentru ca tonalizatorul afectiv să genereze starea de „plăcere" în reţeaua nervoasă. Evident că şi informaţia de saturaţie generează o stare de „plăcere". Precizăm că termenii de „plăcere" şi „neplăcere" reprezintă, în cazul animalelor, o antropomorfizare.

Semnalele care provin de la factorii perturbanţi generează în reţeaua nervoasă o stare de neplăcere asemănătoare cu suferinţa umană. Se poate considera că apariţia neplăcerii rezultă din neconcordanţa dintre factorul excitant şi programul care corespunde trebuinţei activate de informaţia motivaţională. În schema algoritmică a comportamentului factorii perturbanţi corespund nesatisfacerii unor condiţii logice.

Factorii perturbanţi pot determina două atitudini din partea fiinţei asupra căreia ei acţionează: o atitudine activă, de înfrîngere a obstacolului ivit, şi una pasivă, de abandonare a programului. Prima atitudine, stenică, în forma sa cea mai intensă, este echivalentul stării de mînie, de furie, întîlnită la om. Forma pasivă, astenică, este echivalentul emoţiilor depresive, a tristeţii umane.

Totdeauna o fiinţă vie va căuta să realizeze starea de plăcere şi să evite starea de neplăcere. Întreaga dinamică a comportamentului tinde spre realizarea stărilor emoţionale pozitive şi spre evitarea celor negative.

În ultimă analiză, reţeaua nervoasă calculează şi alege acea activitate care asigură, în condiţii optime, saturaţia programelor comportamentale.

Scanned with OKEN Scanner

X. *3. Învățarea automată.* 1. Comportamentul real al unui animal nu rămîne dirijat numai de programele rigide ale activității motorii înnăscute. În cursul existenței animalului sistemul nervos se restructurează, fiind în primul rînd vorba de un proces de adaptare optimă la informații și condiții logice neprevăzute în programele determinate

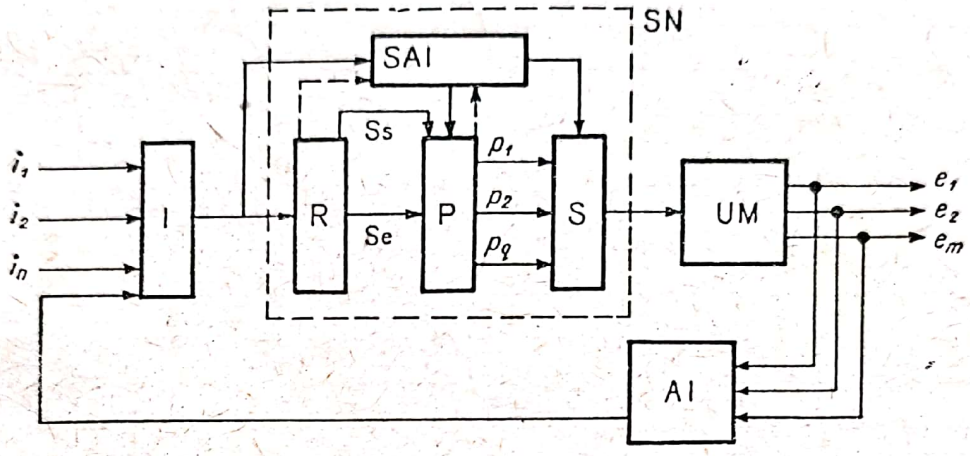


Fig. 10,6. Schema logică a comportamentelor învățate
SAI – sistem adaptiv instruibil

genetic. Restructurarea reprezintă o istoricizare a rețelei nervoase, adaptarea făcîndu-se pe baza experiențelor biologice succesive ale fiecărui exemplar în parte, în cadrul așa-numitului proces de învățare (*learning*). Aceasta înseamnă o completare a schemei de circulație a informației prin adăugarea unui sistem adaptiv instruibil (fig. 10,6).

În afara elementelor care figurau în schemele precedente ale acestui capitol, în figura 10,6, blocul *SN*, corespunzător sistemului nervos, cuprinde și blocul care reprezintă sistemul adaptiv instruibil *SAI*. Astfel de sisteme sînt eventual rețele paucineuronale instruibile, de tipul celor descrise în capitolul IV.

Instruirea este o proprietate generală a tuturor neuronilor, în sensul că fiecare neuron are o comportare diferită, conform propriei sale istorii. Rezultă, că, în principiu, instruirea se poate realiza la orice nivel al nevraxului. Adevărata învățare se realizează însă numai în etajele superioare ale sistemului nervos. La vertebrate, aceasta are loc în etajele supramezencefalice. Cu cît acestea au

Scanned with OKEN Scanner

un grad de complexitate mai mare, cu atît adaptarea se face mai subtil. Comportamentul învăţat prezintă faţă de comportamentul înnăscut, o serie de diferenţe importante, care ţin de prelucrarea informaţiei în sistemul adaptiv postulat. În primul rînd, se îmbogăţeşte repertoriul semnalelor semnificative, repertoriu care este mai bogat decît acel al semnalelor evocatoare şi motivaţionale înnăscute, ca şi al semnalelor declanşatoare de reflexe propriu-zise. În al doilea rînd, se îmbogăţeşte repertoriul activităţii motorii prin noi combinaţii de acţiuni elementare şi, în special, de subprograme. În al treilea rînd, sporeşte extensia în spaţiu, şi mai ales în timp, a finalizării comportamentului. Ţinta de realizat poate fi mai îndepărtată în spaţiu, dar mai ales în timp. Se dezvoltă posibilităţi de anticipare din ce în ce mai ample. Ca un corolar, rezultă posibilitatea unor desfăşurări comportamentale din ce în ce mai complexe — cu traiectorii din ce în ce mai complicate şi cu variante din ce în ce mai numeroase. Strategia relativ simplă şi rigidă a comportamentului înnăscut se complică astfel considerabil şi analiza lui logico-matematică devine din ce în ce mai dificilă.

Cel mai complex grad de adaptare îl realizează sistemul nervos al omului. Apariţia gîndirii umane reprezintă o complicare considerabilă a sistemului adaptiv instruibil, în dependenţă de apariţia limbajului şi de motivaţia socială.

Învăţarea nu suprimă comportamentele înnăscute; ambele rămîn în paralel, se influenţează reciproc, intră uneori în competiţie unele cu altele. O dată cu evoluţia, rolul comportamentelor învăţate şi apoi rolul gîndirii devin dominante în dinamica fiinţelor vii.

Modul în care se realizează adaptarea şi învăţarea nu este încă suficient clarificat. Cea mai plauzibilă ipoteză este că prin învăţare se modifică electiv pragurile neuronale. Nu este însă exclus ca în acest proces să se modifice şi alte constante, de exemplu, nivelul de saturaţie sau constantele de timp ale neuronilor.

În general, procesul de învăţare determină o restructurare funcţională a reţelei neuronale, prin intervenţia unor

Scanned with OKEN Scanner

factori de pondere — pozitivi sau negativi — care acționează asupra unor conexiuni sau circuite neuronale.

2. Un prim aspect al învățării este reprezentat de stingerea reflexului de orientare, fenomen descoperit de Pavlov și studiat de Sokolov. Orice excitant, atunci cînd acționează asupra unui organism viu, determină un reflex de orientare, care este un răspuns nespecific ce se obține paralel cu răspunsul specific respectiv. Efectele răspunsului de orientare se manifestă în domenii diferite.

a. Pe planul activității motorii se produc mișcări ale capului, ochilor și, la unele specii, ale urechilor, aceste mișcări tinzînd să plaseze organele senzoriale în situația cea mai favorabilă pentru detectarea excitației.

b. Pe planul activității vegetative, se produc modificări respiratorii și, în special, cardiocirculatorii, care duc la o ameliorare sensibilă a regimului circulator cerebral.

c. La nivelul organelor receptorii se produce o scădere a pragurilor — deci o creștere a receptivității — ca urmare a influenței sistemelor de reglare centrifuge a receptorilor. Aceasta reprezintă o modalitate de manifestare a principiului cibernetic, conform căruia sistemul nervos își reglează „volumul" intrărilor pentru a asigura în permanență o activitate optimă a sistemului nervos.

d. Pe electroencefalogramă apar aspecte caracteristice de desincronizare a traseelor și de apariție a ritmului beta.

Aceste răspunsuri ale organismului pot avea uneori o durată mai lungă de o oră : sîntem în prezența unui răspuns tonic, la baza lui existînd o activare a sistemului nervos prin formațiunea reticulată. În alte cazuri, răspunsul este scurt (fazic), de ordinul minutelor, la baza lui fiind o activare prin sistemul activator thalamic.

Stingerea reflexului de orientare apare atunci cînd, provocînd de mai multe ori apariția unui reflex de orientare cu un același stimul, efectele reflexului scad, iar apoi dispar cu desăvîrșire : este fenomenul de obișnuință.

Dacă, după dispariția prin obișnuință a reflexului de orientare, aceluiași animal i se aplică un excitant care diferă de primul excitant chiar cu foarte puțin — cu un bit — reflexul de orientare reapare.

Scanned with OKEN Scanner

Rezultă că în sistemul nervos se memorează orice excitant care se repetă de mai multe ori. Sokolov susține că în rețeaua nervoasă se elaborează un model al excitantului — indiferent de natura sau de complexitatea acestuia. Uneori poate fi vorba de un excitant polisenzorial. Acest model este apoi utilizat de rețeaua nervoasă pentru a-și schimba modul de prelucrare a informațiilor.

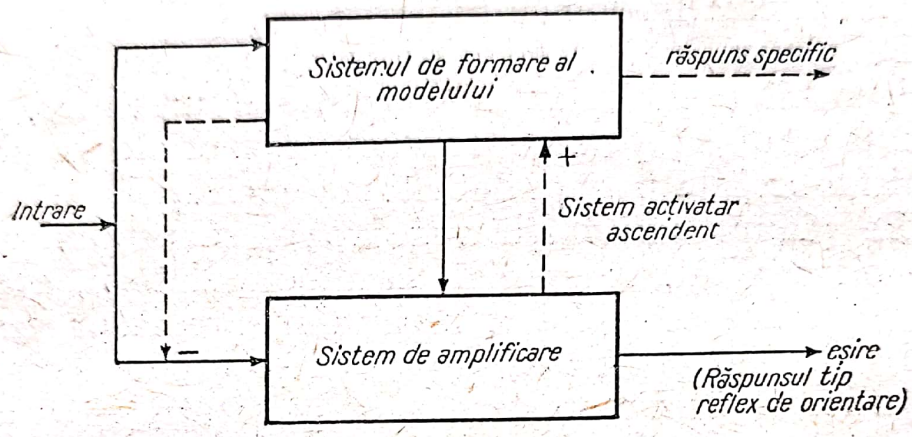


Fig. 10,7. Schema reflexului de orientare (după Sokolov)

În cazul experiențelor referitoare la reflexul de orientare, excitantul, acționînd la un moment dat, este comparat cu excitanții care au activat asupra animalului în perioada de timp premergătoare. Dacă noul excitant este identic cu modelul existent reflexul de orientare este blocat. Dacă însă apare o diferență, reflexul de orientare se produce. Stingerea reflexului de orientare arată că în sistemul nervos informațiile memorate modifică funcționarea rețelei neuronale. Totodată, se vede că în sistemul nervos operația de recunoaștere se face cu o precizie mare. Tot experiențele arată că la mamifere stingerea reflexului de orientare se datorează intervenției active a scoarței cerebrale.

R. Hernandez-Péon și H. Brust-Carmona au arătat că fenomenul de obișnuință apare și în cazul altor reflexe. Obișnuința se poate obține — în cazul unor reflexe mai simple — și la animalele lipsite de cortexul cerebral — ceea ce arată că scoarța nu este absolut necesară pentru elaborarea comportamentului de obișnuință.

Scanned with OKEN Scanner

3. În cazul obișnuinței, modelul stocat în rețeaua nervoasă, și care reprezintă excitantul, este utilizat ca un filtru, ce intervine ca un factor de pondere negativ. Dar acest model poate fi utilizat și în alte moduri, de exemplu la formarea unui reflex condiționat.

În acest caz, asocierea a doi stimuli diferiți este memorată ca atare, constituind un eveniment, un model unic. Acest model se elaborează după un număr de aplicări concomitente ale celor doi stimuli și modifică funcționarea rețelei.

Presupunem că stimulul *a* declanșează o activitate motorie înnăscută — un reflex sau un comportament, — iar stimulul *b* este indiferent pentru animalul respectiv. Evenimentul notat simbolic $a + b$ și care rezultă din aplicarea simultană, sau aproape simultană, a evenimentelor *a* și *b*, constituie un eveniment care duce la elaborarea în rețeaua nervoasă a unui model, care funcționează cu o pondere pozitivă. Aplicarea, chiar izolată, a lui *b*, este recunoscută de rețea ca făcînd parte din modelul $a + b$ și ca atare declanșează efectul motor al întregului model, deci în speță a lui *a*. Datorită memoriei, s-a stabilit o anumită legătură funcțională între *a* și *b*, rețeaua nervoasă prelucrînd în alt mod stimulul *b* după realizarea asociației decît înainte. După realizarea reflexului condiționat, *b* nu mai este un stimul indiferent, ci semnalizează apariția lui *a*.

Dacă însă se aplică izolat *b*, fără *a*, după un număr de astfel de experimente reflexul condiționat dispare: rețeaua nervoasă, înregistrînd aceste necoincidențe, nu mai constată asocierea lui *a* cu *b* și deci șterge legătura stabilită anterior.

Dacă însă vom asocia din nou pe *a* cu *b*, reflexul condiționat respectiv se formează din nou, de data aceasta foarte repede.

Rețeaua nervoasă își modifică în permanență modul de prelucrare a informației aferente, în funcție de corelațiile statistice dintre stimuli. Determinarea de către *b* a efectului produs de către *a* este rezultatul distribuției statistice în cazul diferitelor experimente efectuate a coincidențelor (*a* și *b*) și anticoincidențelor (*b* se produce fără a se produce *a*). Se poate spune (Uttley) că în elaborarea unui reflex

Scanned with OKEN Scanner

condiționat rețeaua nervoasă stabilește probabilitatea condiționată a lui a în raport cu b, definită prin relația

$$P_b(a) = \frac{P(a+b)}{P(b)} \qquad (10,1)$$

Un model elementar, capabil să realizeze o operație de acest tip, a fost prezentat în capitolul IV. Desigur că atunci cînd structura rețelei se complică foarte mult, ea este capabilă să prelucreze stimuli complecși. În aceste cazuri, modelele neuronale ale excitanților a și b trebuie să aibă o structură spațială foarte complexă, ceea ce implică însă intervenția unor sisteme de recunoaștere foarte fine, așa cum o demonstrează inhibiția de diferențiere și obișnuința.

Cu cît discriminarea (diferențierea) este mai fină, cu atît intră în joc ansambluri neuronale mai vaste. Deși proprietatea de a forma o legătură temporară se găsește la nivelul unor rețele simple, de exemplu la viermii plați posibilitatea de a forma corelații statistice între stimuli complecși și de a face discriminări fine între stimuli foarte asemănători implică structuri complexe. Cele mai nuanțate legături temporare sînt acelea care se realizează prin circulația și stocarea informației în scoarța cerebrală a mamiferelor și în special a omului. Analiza fenomenelor electrocorticale în cursul condiționării (Galambos, Rusinov) pare a indica existența unor procese complexe, în care intervin și structurile subcorticale — în special formațiunea reticulată (Gastaut) —, precum și sistemul limbic (Adey, Sager).

Legăturile temporare constituie unul dintre mecanismele de bază ale activității nervoase superioare. Datorită legăturilor temporare, sistemul nervos se adaptează la mediu, învățînd — din proprie experiență — să stabilească o corelație statistică între anumite obiecte și fenomene ale naturii, dintre care unele au o semnificație prealabilă, iar altele nu au nici una. În felul acesta, mediul biologic poate exercita asupra activității motorii o determinare mai complexă și mai nuanțată. Deoarece stimulul condițional b precede pe cel necondițional a, apare și funcția de anticipare, în sensul că relația (10,1), se referă la evenimente

succesive, stînd astfel la baza previziunii cu o anumită probabilitate p a evenimentului a, dacă s-a realizat evenimentul b.

Pavlov a arătat că această anticipare poate să fie foarte mult prelungită în timp, în cadrul așa-numitelor reflexe condiționate de urmă, cu condiția ca în cursul învățării (sau condiționării), a să urmeze după b mereu la același interval de timp (timpul de decalaj să fie o constantă).

O serie de experimente efectuate asupra viermilor plați ne pun în prezența unor fenomene interesante, din care pare a rezulta că, în cazul animalelor inferioare, reflexul condiționat antrenează de fapt întregul sistem nervos al animalului respectiv. Realizînd un anumit reflex condiționat asupra unui vierme plat, după ce acesta este secționat, fiecare jumătate duce la formarea unui nou vierme plat, care va prezenta din nou același reflex.

Mecanismul intim prin care se restructurează rețeaua nervoasă în cadrul reflexului condiționat la acești viermi nu se cunoaște încă.

4. În cazul în care un animal execută o mișcare sau o succesiune de mișcări, acestea se înregistrează în sistemul nervos sub forma unui model neuronal, pe baza informațiilor primite de la propioceptori — din mușchi, tendoane și articulații —, de la aparatul vestibular, ca și de la exteroceptori. Activitatea animalului respectiv este influențată de aceste modele de mișcări.

a. Dacă un șoarece înfometat este introdus într-un labirint, la care într-unul din colțuri se află alimente, șoarecele va parcurge la început la întîmplare toate compartimentele și fundurile de sac ale labirintului, pînă cînd va găsi alimentele respective. Introducînd de mai multe ori același șoarece în același labirint și alimentele fiind dispuse mereu în același loc, se constată că mișcările de căutare ale șoarecelui se simplifică din ce în ce mai mult, pentru ca în cele din urmă animalul să parcurgă fără ezitări drumul cel mai scurt de la intrarea în labirint la locul unde se află alimentele.

Rezultă în primul rînd că, pe baza memorării mișcărilor întîmplătoare de căutare și pe baza experienței acumulate,

Scanned with OKEN Scanner

șoarecele elaborează în sistemul său nervos un model al labirintului respectiv. El învață apoi să elimine toate mișcările inutile, executînd în final numai mișcările utile, optimizîndu-și mișcările de căutare. Lucrurile stau ca și cum experiența efectuată în cursul stării apetitive, în care căuta stimulul evocator generator de plăcere, l-a condus la metoda (strategia) prin care găsește acest stimul evocator cu un efort minim.

Există și modele tehnice (Shannon) care se referă tot la acest proces de învățare. „Șoarecele electronic" învață de la prima încercare care este drumul cel mai scurt. Aceasta, datorită faptului că modelul este prevăzut cu o rețea specială de memorare.

b. După cum se știe, sub influența unui stimul motivațional se generează o stare apetitivă, în cursul căreia animalul caută să găsească stimul evocator. Animalul înregistrează mișcările aleatorii executate în această stare, reținînd în special corelația statistică dintre un anumit program de mișcare și starea de plăcere generată de găsirea stimulului evocator. Principiul de realizare a acestei legături este același ca și în cazul formării unui reflex condiționat. Animalul „învață" stabilind o probabilitate condiționată între o anumită activitate motorie și apariția unei stări de plăcere. Plăcerea constituie în felul acesta un factor de pondere. Animalul va alege întotdeauna mișcările cu pondere maximă. Aceasta este baza învățării prin condiționare instrumentală sau operantă.

Cînd stimulul motivațional generează trebuința, animalul execută acțiunea pe care a învățat-o și ajunge astfel, în condiții optime, la stimulul evocator. Optimizarea implică, desigur, alegerea acțiunilor care duc la găsirea obiectului sau fenomenului generator de stimul evocator și apoi la alegerea dintre acestea a acelui comportament care implică minimum de efort, conform celor expuse anterior.

Toate acestea reprezintă o altă formă de adaptare a comportamentelor înnăscute la condițiile de mediu. În cadrul acestui proces, animalul poate anticipa stimulul evocator printr-o anumită acțiune în cursul stării apetitive — uneori îl poate provoca.

Scanned with OKEN Scanner

Aceste acțiuni pot avea complexități variabile. Uneori poate fi implicată și folosirea unor instrumente sau efectuarea unor acțiuni date, cum ar fi, de exemplu, apăsarea pe o anumită clapă, acțiune pe care animalul o descoperă și o învață cu totul întîmplător. În această formă de învățare se situează — cu oarecare diferențe — și dresura, caz în care animalul învață că, printr-o anumită succesiune de mișcări, care constituie performanța dorită de dresor, el ajunge la stimulul evocator, ce constă pe de o parte, într-o răsplată de tip alimentar, iar pe de altă parte, duce la eliminarea sancțiunilor corporale care i se aplică atunci cînd nu execută succesiunea de mișcări date.

Extrem de interesante sînt în acest sens experiențele lui Olds și Olds. Aceștia introduc electrozi cronici în creierul șobolanului, într-o zonă a cărei excitare generează animalului o stare de plăcere. Șobolanul este apoi introdus într-o cușcă, unde se găsește și o clapă care, atunci cînd este apăsată, închide un circuit electric ce alimentează electrozii cronici cu semnal electric — ducînd prin aceasta la o excitare a „centrilor de plăcere". Lăsat liber în cușcă, animalul execută diferite mișcări întîmplătoare, printre care și apăsarea pe clapa generatoare de plăcere. O dată descoperită această legătură statistică între acțiunea de a apăsa pe clapă și starea de plăcere, animalul nu mai este ocupat decît de declanșarea aceasta artificială de plăcere: șobolanii ajung să-și provoace pînă la 7 000 de excitații pe oră.

Tot Olds și Olds au demonstrat experimental că atunci cînd electrozii cronici se introduc în creierul șobolanilor în zone care generează neplăcere, animalul învață singur să se ferească de orice acțiune care ar putea declanșa excitarea acestor electrozi.

c. În paragrafele precedente s-a arătat că animalele învață să aleagă anumite acțiuni în funcție de un factor de pondere pozitiv (probabilitatea de a realiza o stare de plăcere, minimum de efort etc.) și în funcție de un factor de pondere negativ (evitarea unor acțiuni neplăcute). Toți factorii capabili să pericliteze existența animalului sînt stări de neplăcere, de suferință. De asemenea, în aceeași categorie

Scanned with OKEN Scanner

intră stimulii dureroşi, ca şi indicii de recunoaştere ai unor factori nocivi.

Modelul neuronal care păstrează mişcările executate de animal permite stabilirea unei corelaţii statistice între anumite acţiuni şi apariţia stării de neplăcere. Animalul învaţă treptat, tot pe baza unor corelări statistice, să anticipeze situaţiile neplăcute şi să le evite, cu atît mai mult cu cît factorul de pondere a situaţiei neplăcute este mai mare. Optimizarea comportamentului poate fi studiată matematic cu ajutorul teoriei jocurilor, animalul adoptînd acea strategie prin care se urmăresc acţiunile cu pondere pozitivă şi se evită cele cu pondere negativă.

5. Învăţarea implică stabilirea, prin punerea în funcţiune a unui sistem de memorie, a unor legături probabilistice între diferite semnale de intrare. Această probabilitate intervine apoi ca un factor de pondere — pozitiv sau negativ — care influenţează reţeaua nervoasă şi deci alegerea răspunsului motor, atunci cînd acţionează anumiţi stimuli. Acest principiu general intervine atît în elaborarea experimentală a reflexelor condiţionate şi în dresură, cît şi în adaptarea biologică naturală a comportamentelor înnăscute.

Şi în cursul desfăşurării programului comportamental — nu numai în cursul stării apetitive — diferitele condiţii realizate de stimulii evocatori succesivi, care acţionează ca factori pozitivi, cît şi de diferiţii stimuli perturbanţi, factorii negativi, pot fi modificate, adaptate prin procesul de învăţare. Aceasta se reflectă prin includerea în algoritmul comportamental a unor condiţii noi, a unor stimuli neprevăzuţi de informaţia genetică, care anticipează cu o anumită probabilitate — şi ca atare pot să înlocuiască — stimulii programaţi genetic.

Uneori, stimuli nociceptivi — deci generatori de neplăcere — pot fi corelaţi statistic cu stimuli generatori de plăcere. În aceste cazuri, stimulul nociceptiv — de exemplu aplicarea unui fier roşu pe piele — poate genera prin anticipare probabilistică o stare de plăcere. De asemenea, comportamentul se îmbogăţeşte cu acţiuni noi destinate să evite efectele negative ale factorilor perturbanţi din

Scanned with OKEN Scanner

mediu, acțiuni descoperite și învățate de animalul respectiv prin încercări multiple, dar care nu erau prevăzute în schema comportamentală înnăscută.

Datorită tuturor acestor procedee, comportamentul devine mai complex decît cel înnăscut, include condiții logice și subprograme motorii mai multe, se extinde spațial și în timp. Astfel, activitatea motorie se îndepărtează în toate direcțiile de traiectoria primară înnăscută și se extinde în timp prin fenomenul de anticipare, care apare în special în cazul condiționării unor semnale evocatoare sau motivaționale de urmă. Anticiparea apare ca o extrapolare predictivă — cu o anumită probabilitate — a unei anumite corelații, sau distribuții statistice, între două sau mai multe evenimente succesive.

Comportamentul învățat pierde din precizia și rigurozitatea celui înnăscut, dar devine mai apt pentru o adaptare mai bună la condițiile reale de existență.

X. 4. *Sistemele de comandă motorie complexă.* 1. Niveluri neurofiziologice. După cum s-a arătat, în general, sistemele de comandă motorie complexă funcționează după principiul unui dispozitiv automat ierarhizat, de tip adaptiv instruibil.

Sistemele de reglaj motor asupra cărora acționează dispozitivul adaptiv sînt evident reprezentate de sistemele de comandă motorie reflexă analizate în capitolul precedent. În felul acesta, din punctul de vedere al teoriei automatelor, analiza motilității ajunge la concluzii analoge celor obținute de Jackson, cu privire la suprapunerea unor sisteme neurofiziologice din ce în ce mai complexe.

Un prim nivel anatomic de localizare a sistemelor de comandă motorie complexă la vertebrate este reprezentat de sistemul thalamic — nucleii bazei, în care trebuie inclus hipothalamusul și rinencefalul. Acesta reprezintă nivelul suprem al comenzii motorii la toate vertebratele submamifere. Structura lui anatomică este destul de complexă. Din punct de vedere informațional, intrările converg dominant pe thalamus, iar ieșirile, care coboară spre etajele inferioare ale nevraxului, ies în mod aproape exclusiv prin nucleii extrapiramidali.

Scanned with OKEN Scanner

Modul în care circulă informaţia în sistemul amintit se cunoaşte, însă datele cu privire la modul în care este prelucrată informaţia, în reţelele neuronale care definesc acest nivel, lipsesc. Principiul general de funcţionare trebuie însă să fie acela al unui automat ierarhizat.

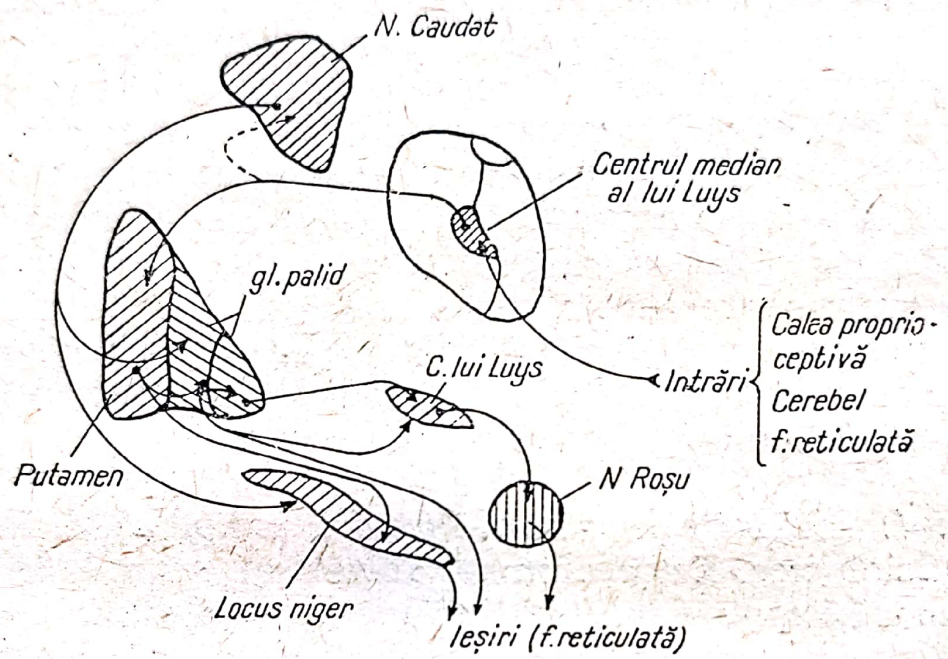


Fig. 10,8. Sistemul thalamo-extrapiramidal

Un al doilea nivel anatomic, propriu mamiferelor, este reprezentat de scoarţa cerebrală care ajunge la un maximum de dezvoltare la om. În acest sistem, intrările sînt reprezentate de capetele corticale ale analizatorilor, ieşirile fiind multiple. Se admite, în general, că ieşirea principală este reprezentată de regiunea circumvoluţiei frontale ascendente (cîmpul 4). De aci pornesc căi de transmisiune nemijlocită către sistemul neuronilor intercalari din jurul unităţilor motorii medulare (sau ale nervilor cranieni). Acest fapt a fost pus în evidenţă atît morfologic, cît şi fiziologic. Tot fiziologic s-a pus în evidenţă o codare spaţială a elementelor din cîmpul 4, codare redată în figura 10,9. Distorsionarea morfologică a acestei figuri (numită homunculus motor), în comparaţie cu forma corpului,

Scanned with OKEN Scanner

trebuie interpretată în acelaşi sens ca şi distorsionarea amintită din analizatorul cutanat (cf. fig. 7,2). Metrica scoarţei cerebrale este, aşadar, şi în acest caz o funcţie a capacităţii de informaţie.

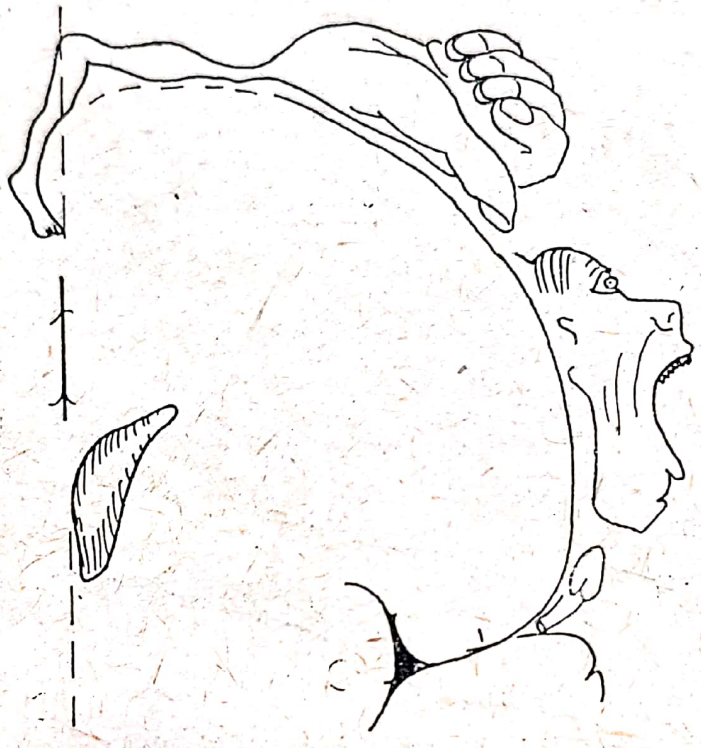


Fig. 10,9. Homunculus motor (După Penfield şi Rasmussen)

Din punct de vedere cibernetic, trebuie amintit şi faptul că în aria 4 trebuie să existe traductori intensitate-număr — aşa cum indică excitările experimentale ale frontalei ascendente. De asemenea, este interesant faptul că fibrele de comandă motorie din aria 4, numite şi fibre piramidale, au o activitate de repaus. Deci, nivelul lor de zero este definit printr-o anumită frecvenţă de descărcare în repaus, bazală.

Alături de această ieşire principală, scoarţa cerebrală mai dispune şi de alte arii motorii (cf. fig. 10,10). Unii autori (Mettler) susţin că din toate ariile corticale pornesc fibre descendente care au un anumit rol în comanda motorie. Este însă aproape cert că, dacă nu toate, cel puţin marea majoritate a fibrelor eferente, care constituie aceste ieşiri,

Scanned with OKEN Scanner

acţionează asupra unităţilor motorii prin intermediul altor formaţiuni subiacente.

Cele două nivele amintite nu funcţionează izolat ci se influenţează reciproc. Anatomia şi electrofiziologia au pus în evidenţă modul în care circulă informaţia între cele

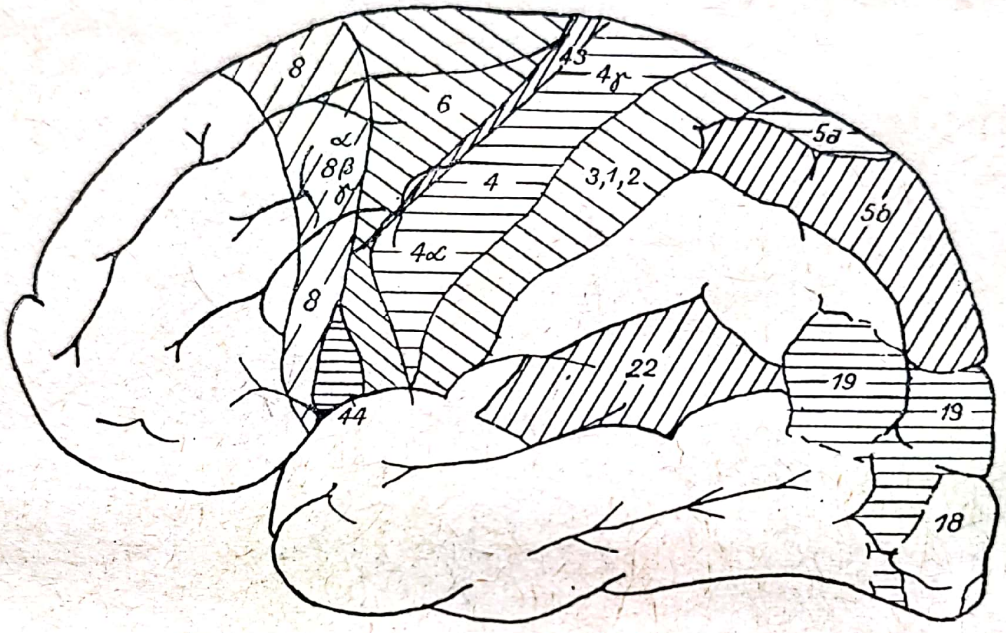


Fig. 10,10. Ariile motorii corticale

două nivele. În figura 10,11 este redată, cu totul schematic, această interrelaţie; detalierea lor se poate afla în lucrări speciale de neurofiziologie (Fulton, Sager).

Analiza fiziologică neurocibernetică a acestei interrelaţii este esenţială pentru înţelegerea motilităţii complexe a mamiferelor. La primate, şi mai ales la om, situaţia devine şi mai complexă, datorită dezvoltării considerabile a scoarţei cerebrale, care deţine un rol din ce în ce mai exclusiv în ceea ce priveşte comanda motorie complexă. Înseşi ieşirile sistemului nucleilor bazali sînt orientate dominant către scoarţa cerebrală.

Toate aceste date nu au numai o importanţă teoretică pentru cunoaşterea creierului, ci şi una practică. În anumite boli (ex. boala lui Parkinson) în care motilitatea este profund perturbată de o circulaţie anormală a informaţiei, venită de la nucleii bazali (*globus pallidum*), s-a dovedit utilă leza-

Scanned with OKEN Scanner

rea experimentală a anumitor circuite de legătură — operație care constituie un exemplu de neurocibernetică aplicată.

2. Rolul cerebelului. Toate sistemele de reglaj ale motilității trebuie să fie armonizate între ele în cursul activității lor. Cu alte cuvinte, toate manifestările motorii reflexe sau comportamentale trebuie să fie optimizate pe baza anumitor criterii: să se realizeze *maximum de economie energetică*; să se realizeze acțiunea în *minimum de timp*; să nu fie compromisă *stabilitatea în spațiu* a organismului (în ortostatism și mers); mișcările să fie *aperiodice* etc.

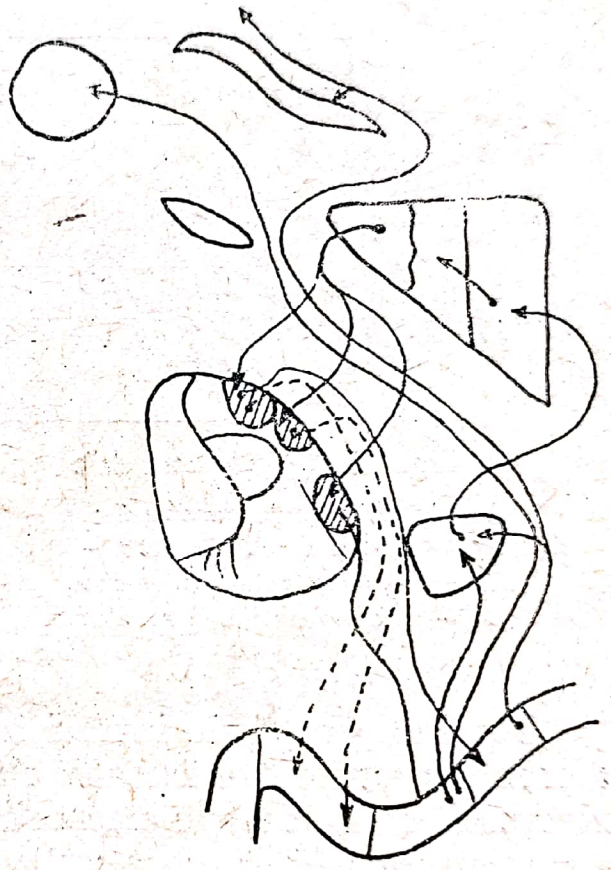


Fig. 10,11. Circuitele corticoextrapiramidale

Aceasta înseamnă că asupra sistemelor de comandă motorie trebuie să acționeze un dispozitiv automat ierarhizat optimal. Rolul de element de conducere în sistemul ierarhizat pare să revină cerebelului, deoarece întreaga structură și fiziologie a cerebelului poate fi subsumată acestui principiu general de funcționare.

Rolul de optimizare al cerebelului asupra motilității iese în evidență cu claritate în cursul leziunilor sale experimentale sau clinice. În aceste cazuri, motilitatea se dezorganizează, astfel încît criteriile enumerate anterior nu mai sînt satisfăcute — ceea ce constituie o interpretare neurocibernetică a diferitelor aspecte ale ataxiei cerebeloase. Pentru detalii fiziologice și fiziopatologice se pot consulta diferite lucrări de specialitate (A. Thomas, Chambers și Sprague, Cincă și Drocan, Fulton și Dow, Kreindler și Steriade, Moruzzi, Sager, Snider).

Scanned with OKEN Scanner

Funcţionarea cerebelului ca un sistem optimal explică şi conexiunile cerebelului — despre care s-a afirmat că este situat în derivaţie pe căile de comandă motorie. În acelaşi mod se explică şi faptul că, deşi funcţiunea lui este inclusă în motilitate, în dirijarea motilităţii el nu acţionează direct asupra unităţilor motorii.

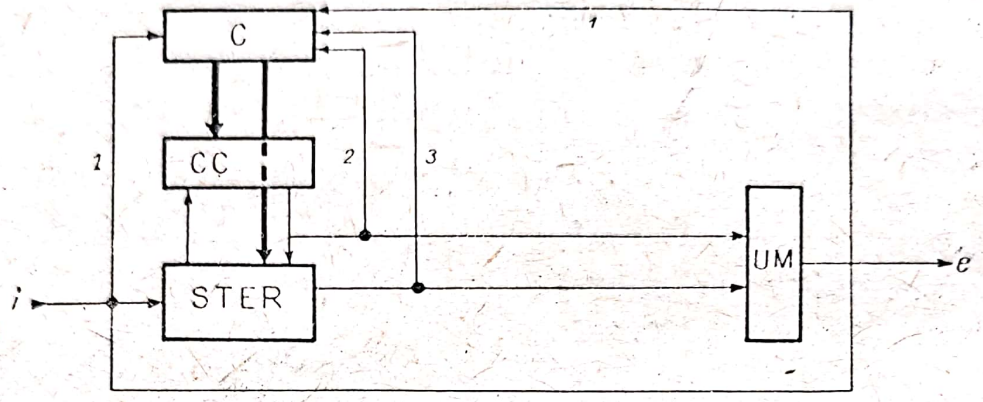


Fig. 10,12. Schema bloc a conexiunilor cerebeloase

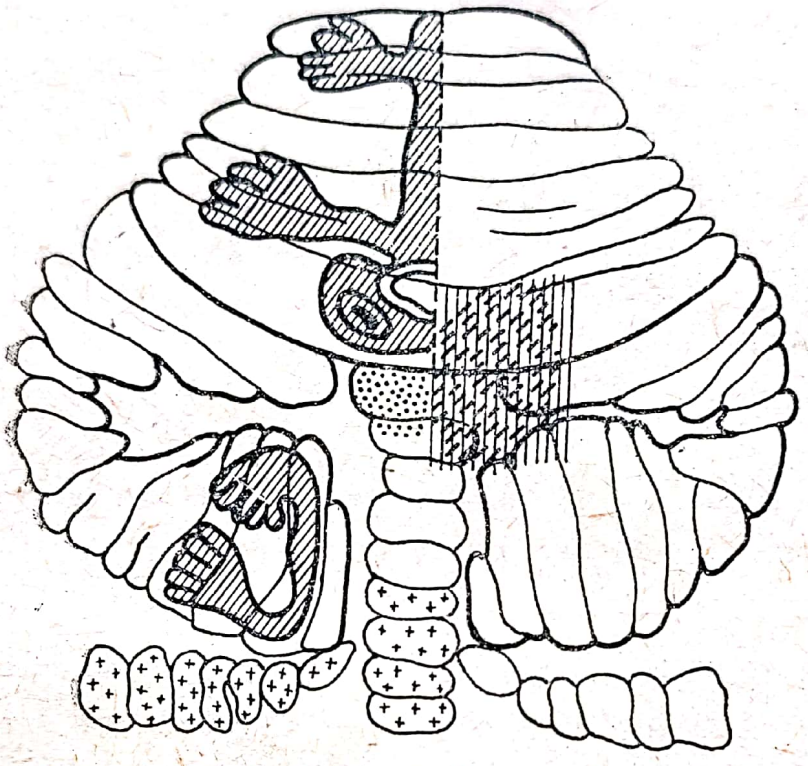
i — intrări (de la receptori); **e** — ieşiri (la efectori); **C** — cerebel; **CC** — cortex cerebral; **STER** — Sistem thalamo-extrapiramidalo-reticular; **1** — fibre spinocerebeloase; **2** — fibre cortico-ponto-cerebeloase; **3** — fibre reticulo-cerebeloase (olivo-cerebeloase); **UM** unităţi motorii

O primă grupă de intrări în cerebel provine de la căile aferente reprezentînd toate cîmpurile receptoare ale organismului. Prin metode electrofiziologice s-a pus în evidenţă codarea spaţială în cortexul cerebelos al tuturor analizatorilor (Snider şi Eldred) — vezi figura 10,13. Datorită acestor intrări, cerebelul este informat asupra valorii mărimilor de intrare în sistemul nervos.

O a doua grupă de intrări provine de la dispozitivele de comandă motorie. În modul acesta, de la cortexul cerebral, prin căile cortico-ponto-cerebeloase, sosesc informaţii la cerebel. Căile palido-olivo-cerebeloase aduc informaţii de la sistemul extrapiramidal. De la sistemele de reglaj motor, informaţiile sosesc prin măduvă şi axul cerebral, aducînd informaţii proprioceptive care ajung, prin pedunculul cerebelos inferior, tot la cerebel. Cu ajutorul acestor intrări, cerebelul este informat de valoarea mărimilor de ieşire ale sistemului comandat.

Scanned with OKEN Scanner

Prin prelucrarea informațiilor referitoare la mărimile de intrare și de ieșire, cerebelul modifică regimul de funcționare al diferitelor sisteme de comandă motorie, astfel încît să realizeze formula motorie optimă atît în ceea ce



Reprezentarea somatică (cîmp 4,3,1,2)
Reprezentarea vizuală (cîmp 17)
Reprezentarea auditivă (cîmp 41)
Reprezentarea motilității oculare (cîmp 8)
Reprezentarea vestibulară

Fig. 10,13. Organizarea funcțională a cortexului cerebelos

privește contracțiile fazice (mișcări), cît și în ceea ce privește pe cele tonice (posturi). În acest sens, cerebelul acționează asupra scoarței cerebrale motorii prin sistemul de conexiuni cerebelo-dento-(rubro)-thalamo-cortical. El acționează de

Scanned with OKEN Scanner

asemenea asupra nivelului subcortical al motilității, prin sistemul cerebelo-dento-(rubro)-hipothalamic sau cerebelo-dento-(rubro)-thalamostriat. În fine, prin fibrele descendente ale pedunculului cerebelos superior, ca și prin fibrele

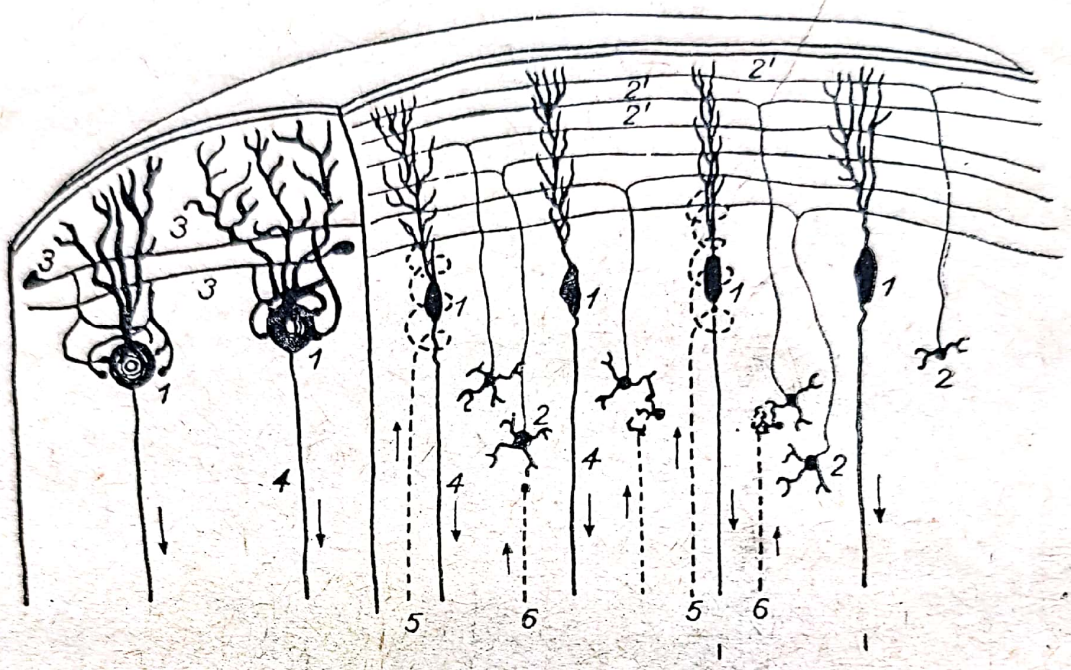


Fig. 10,14. Planul de structură a scoarței cerebeloase

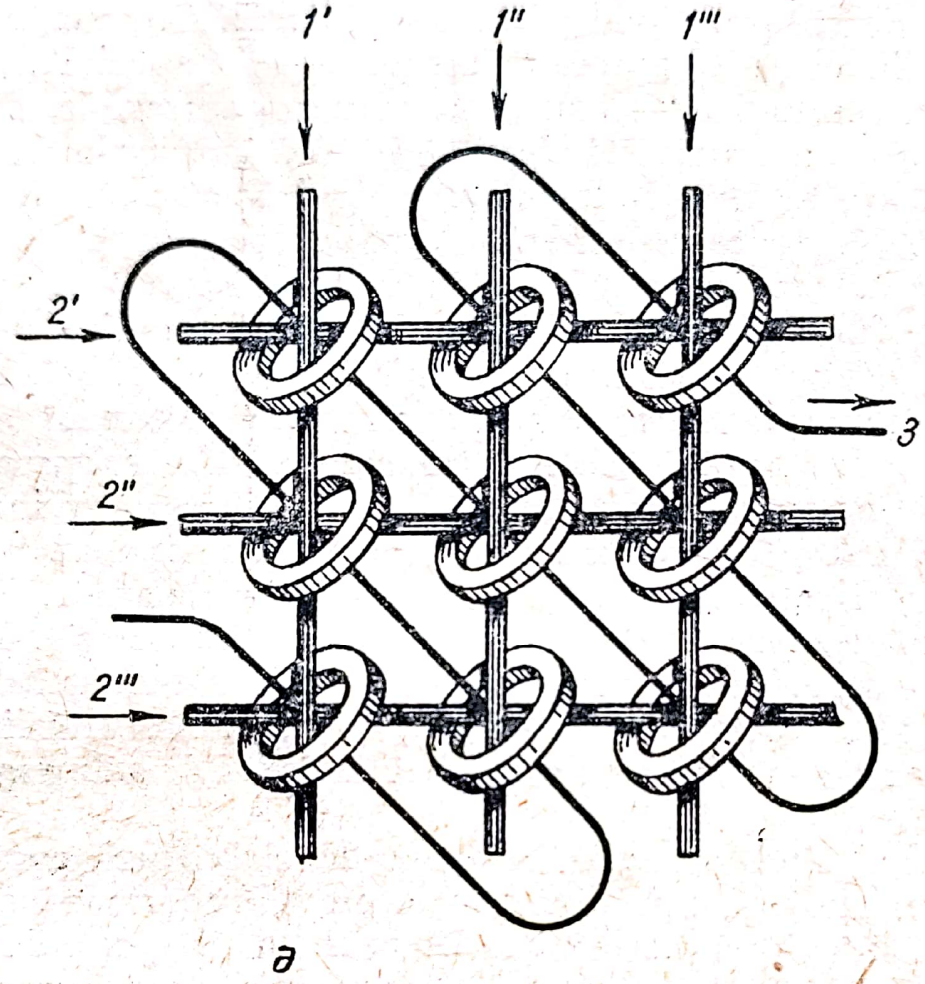
1 — Celulă Purkinje; 2 — celulă granulară (cu crampoane); 3 — celulă orizontală (cu coșulețe); 4 — ieșire (axon al celulei Purkinje); 5 — intrare (celulă acățătoare); 6 — intrare (celulă mușchioasă)

cerebelifuge din pedunculul cerebelos inferior, cerebelul își transmite influența sa asupra formațiunii reticulate, nucleilor vestibulari și, indirect, prin intermediul sistemului gamma, asupra unităților motorii.

Modul cum operează rețeaua cerebeloasă nu este pe deplin cunoscut. Se știe că informațiile sînt transmise sub forma unor frecvențe de ordinul de mărime 100 — 200 Hz. Se știe, de asemenea, că rețeaua neuronală este organizată sub forma unui sistem ortogonal. Prezența celulelor mari ale lui Purkinje la intersecția sistemelor axelor ortogonale amintește de modul de organizare a unei matrici cu ferite (cf. fig. 10,15). Aceasta sugerează ideea că cerebelul stochează anumite mesaje în legătură cu motilitatea, ceea ce permite ca el să funcționeze ca un automat instruibil.

Scanned with OKEN Scanner

Activitatea cerebelului se manifestă și în repaus. El are un nivel de zero, rețeaua neuronală cerebeloasă realizînd prin descărcările sale fondul bazal al activității cerebelului, fond care este modulat de mesaje aferente.



a

Fig. 10,15. Memorie cu ferite

Modularea respectivă acționează apoi asupra sistemelor de comandă. Scoarța cerebeloasă își transmite mesajele prin intermediul nucleilor cerebeloși, care funcționează în principiu ca niște filtre de frecvență. Acești nuclei selectează diferitele mesaje cerebelifuge, distribuindu-le apoi în funcție de frecvența respectivă.

3. Programele motorii stocate. Fiecare acțiune motorie complexă este formată din combinarea mai multor subprograme motorii. Este foarte probabil că o parte din aceste subprograme sînt stocate în nucleii de la bază.

Scanned with OKEN Scanner

Foerster a susținut chiar că dezordinea motorie care caracterizează sindroamele extrapiramidale hipercinetice provine din activarea unor formule cinetice — deci a unor programe sau subprograme motorii — stocate în nucleii de la bază.

De asemenea, și în scoarța cerebrală trebuie să existe stocuri de subprograme sau subrutine. Dezorganizarea lor la om, în cursul leziunilor frontale — în special a celor legate de cîmpul 6 —, duce la o dezorganizare a motilității, care se manifestă prin aceea că mișcările nu mai sînt alcătuite din juxtapunerea logică a unor formule cinetice elementare normale; apare ceea ce s-a numit apraxia inervatorie a lui Kleist.

Dat fiind caracterul instruibil al sistemului nervos, rezultă că formulelor cinetice înnăscute li se adaugă mereu alte formule cinetice, care rezultă din experiența individuală. În modul acesta, repertoriul de subprograme motorii disponibile crește o dată cu evoluția fiecărui individ. Pare plauzibil să se afirme că la mamifere (inclusiv omul) stocul cortical este cel care se îmbogățește o dată cu istoria fiecărui exemplar în cadrul său ecologic (sau social). Îmbogățirea stocului de subprograme constituie substratul cibernetic al perfecționării. Deci, în cazul motilității, perfecționarea se traduce prin mărirea stocului de subprograme motorii.

Atunci cînd sistemul de comandă elaborează comanda motorie, el alege din stoc o serie de subprograme pe care le combină după necesități. Desigur că alegerea depinde de condițiile inițiale, adică de repertoriul de subprograme stocate, de starea aparatului locomotor, tonusul afectiv, motivație etc. Alegerea depinde de asemenea de țelul final care trebuie atins, de diferitele perturbații ivite, ca și de anumite criterii, ca de exemplu criteriul efortului minim. Alegerea subprogramelor și organizarea lor poate fi analizată, ca orice problemă de strategie, cu ajutorul teoriei matematice a jocurilor.

Regăsim o mulțime, un repertoriu finit de elemente vectoriale, care este stocul de subprograme, un sistem de reguli (legile fiziologice ale motilității) și o repartizare de valori (în funcție de atingerea scopului, de cheltuiala

Scanned with OKEN Scanner

energetică etc.). Alegerea subprogramelor (deci structura programului unei mișcări) trebuie să țină seama de realizarea unei speranțe matematice optime cu privire la distribuția de valori care se va obține. În analiza matematică a acestei strategii este util conceptul (introdus de O. Onicescu) de generator (jucător) aleator. Factorii de mediu pot fi subsumați acestui concept în numeroase cazuri.

În acest caz, orice mișcare complexă poate fi exprimată simbolic ca o partidă care se joacă împotriva factorilor de mediu.

În cazul jocurilor, în general, întîlnim o alegere discontinuă din matricea care definește valorile finale distribuite.

În cazul motilității, teoria poate fi generalizată (Bălăceanu și Nicolau), fiecare mișcare putînd fi reprezentată printr-un vector care variază continuu în timp, cu condiția ca valorile pe care le ia să fie incluse într-un domeniu mărginit, ce definește repertoriul mișcărilor posibile. Trebuie să credem că este necesar să se ia în considerare atît variația în timp a vectorului, cît și derivatele în raport cu timpul ale componentelor sale (ceea ce corespunde pe plan fiziologic la viteza de execuție a diferitelor mișcări elementare).

Locul în care se efectuează aceste operații este bineînțeles rețeaua neuronală — probabil lobul parietal. Este evident că planificarea mișcărilor depinde de stocul disponibil de subprograme de mișcări, dar depinde și de anumite referințe spațiale, în raport cu corpul și poziția relativă a diferitelor segmente corporale (așa-numita imagine corporală), referințe formate în special pe baza informațiilor de la proprioceptori.

Planificarea mișcărilor mai depinde de un sistem de referință spațială extracorporal, format în special prin analiza informațiilor venite de la proprioceptori, de la receptorii vizuali, de la cei labirintici.

Patologia umană cunoaște diferite aspecte legate de dezorganizarea programelor de mișcări complexe, cum ar fi apraxiile ideocinetice. Legate de acestea sînt și apraxoagnoziile și parapraxiile agnostice din cursul apraxotopagnoziilor și asomatognoziilor.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul XI

MECANISMELE SENZORIALE

XI, *1. Generalități.* În capitolele precedente s-a arătat în ce mod comportamentul, în primul rînd cel corespunzător instinctelor, este reglat de o serie de programe fixe, al căror algoritm este stabilit de informația genetică. De asemenea, s-a arătat cum datorită activității sistemului nervos și datorită intervenției sistemelor de memorie comportamentul devine mai complex, mai nuanțat, algoritmii genetici restructurîndu-se în cadrul procesului de adaptare la mediu.

S-a arătat de asemenea cum excitanții detectați de organele receptoare determină în sistemul nervos formarea și memorarea de modele ale excitanților respectivi, ca și a programului prin care organismul răspunde la ei. Sistemul nervos utilizează apoi aceste modele în prelucrarea informațiilor aferente.

Aceste modele pot lucra uneori ca un filtru pozitiv, ca de exemplu, în elaborarea reflexelor condiționate, alteori ca un filtru negativ, ca de exemplu, în fenomenul de obișnuință sau în inhibițiile condiționate. În cursul procesului de învățare automată aceste modele sînt corelate cu stimuli motivaționali, evocatori, perturbanți sau de saturație ai programelor genetice, ceea ce asigură restructurarea acestor programe și adaptarea lor mai adecvată condițiilor de mediu.

În evoluția filogenetică, organismele au urmat două căi de perfecționare a procesului de adaptare. Prima este reprezentată de perfecționarea programelor înnăscute, cale care își atinge apogeul în lumea insectelor și, în special, la himenoptere, unde există cei mai complecși algoritmi comportamentali înnăscuți, dar care sînt ficși, nemodifi-

Scanned with OKEN Scanner

cabili. A doua cale este reprezentată de perfecționarea sistemelor adaptive instruibile, care restructurează programele înnăscute. O primă modalitate — analizată în capitolul precedent — se realizează prin învățarea automată, care constă în folosirea directă și reversibilă a modelelor realizate în cadrul unui sistem special de reprezentare. Aceste modele se elaborează în funcție de anumite corelații statistice dintre excitanții respectivi și unele semnale comportamentale.

O altă modalitate de perfecționare a adaptării constă în folosirea modelelor reprezentative, după ce ele au fost supuse în prealabil unor operații de complexitate variabilă, efectuate de sistemul nervos. Această ultimă modalitate stă la baza gîndirii și ea constituie etapa maximă de evoluție a comportamentelor, incluzînd și conștiința umană.

XI, *2. Niveluri de conștiență.* Deoarece prelucrarea informațiilor se face în cortexul cerebral, este necesar ca atunci cînd scoarța primește informații de la diferiți receptori ea să aibă un anumit regim funcțional — regim special, care se realizează prin activitatea nespecifică a scoarței cerebrale.

Magoun este acela care a pus primul în evidență existența în trunchiul cerebral a unui sistem neuronal care este activat în mod nespecific de către oricare dintre receptori. Aceasta înseamnă că starea lui nu depinde de natura excitanților care acționează asupra animalului, ci este o funcție de acțiunea simultană a tuturor acestor excitanți, eventual de suma lor. Dacă nivelul acestei sume depășește un anumit prag, sistemul neuronal respectiv — denumit formațiunea reticulată — bombardează în mod aleator cortexul cerebral cu impulsuri nervoase, creînd — pe baza principiului facilitării — un regim anumit de funcționare a circuitelor neuronale respective. În figura 11,1 se reprezintă în mod schematic sistemul reticulat.

Ulterior, alte cercetări, efectuate în special de Dempsey și Morisson, Jaspers au pus în evidență un alt sistem analog acestuia, și anume sistemul de recrutare nespecifică thalamo-cortical.

Scanned with OKEN Scanner

Sistemele de activare nespecifică a cortexului îi asigură acestuia mai multe regimuri de funcţionare, ceea ce corespunde mai multor nivele de conştiinţă. În acest sens, distingem în mare: starea de comă, starea de somn

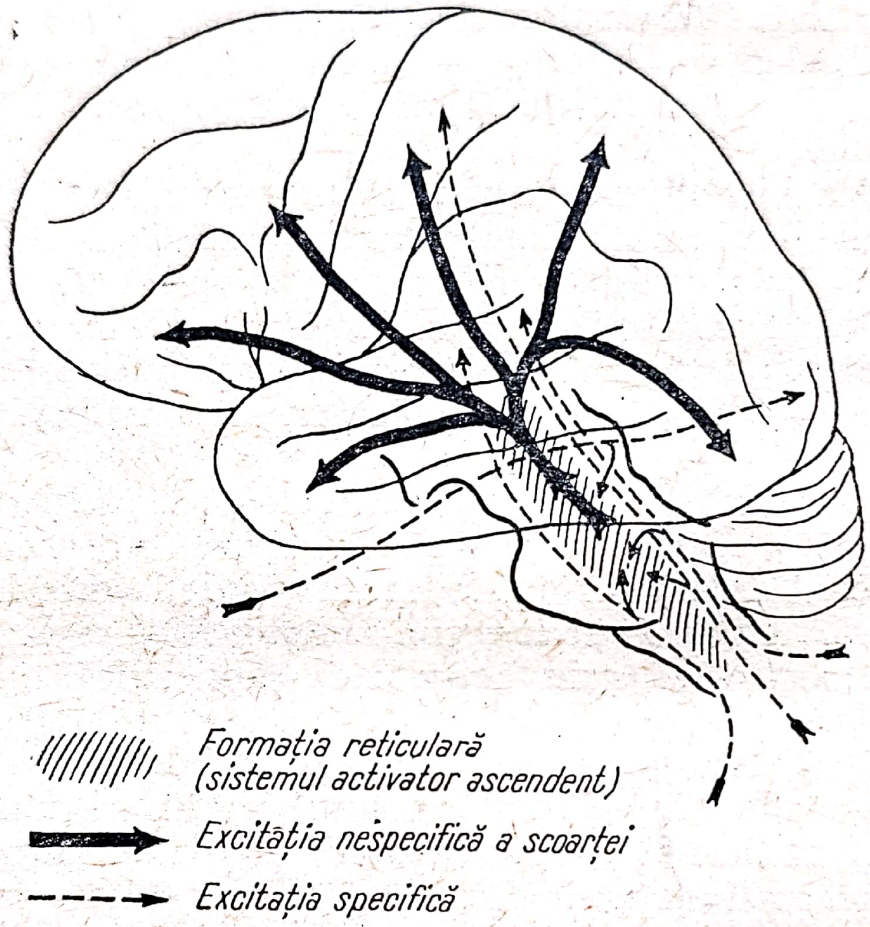


Fig. 11,1. Sistem activator ascendent

(cu diferite grade de profunzime); starea de veghe. Fiecare dintre aceste stări reprezintă cîte un tip de activitate a cortexului, care poate fi identificat cu ajutorul electroencefalogramei (fig. 11,2).

În cortexul cerebral se pot produce modificări ale activităţii electrice în crize paroxistice, în cursul cărora apar anomalii generate de un focar patologic de excitaţie. În aceste cazuri, apar regimuri anormale de funcţionare a cortexului, proprii diferitelor tipuri de epilepsie, care şi ele se traduc în mod caracteristic pe electroencefalogramă (fig. 11,3).

Scanned with OKEN Scanner

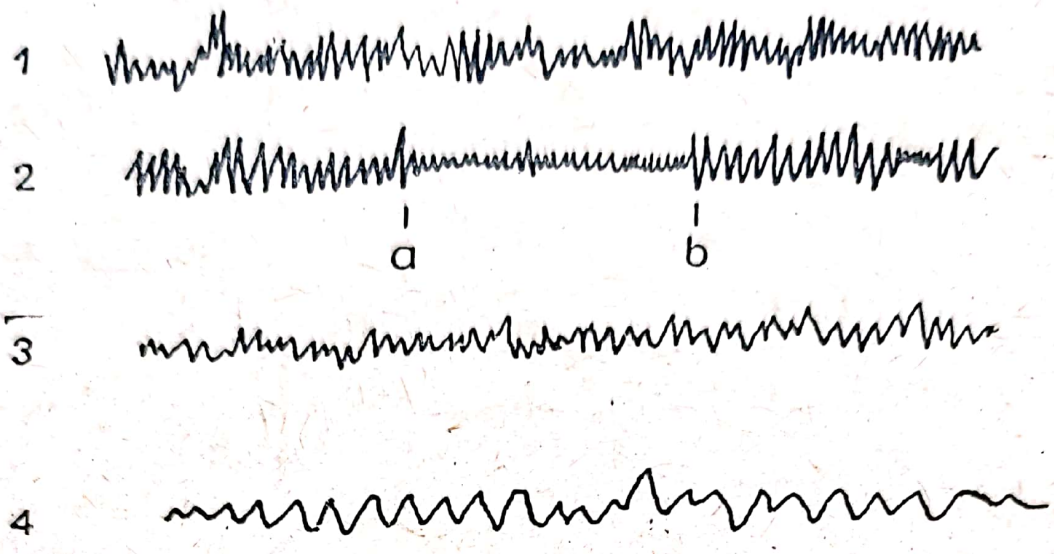


Fig. 11,2. Electroencefalogramă normală

1 și 2 în stare de veghe; (Se vede ritmul alfa (10 Hz) caracteristic. În porțiunea a–b se vede ritmul beta în cadrul unei reacții de oprire); 3 în somn ușor; 4 în somn profund

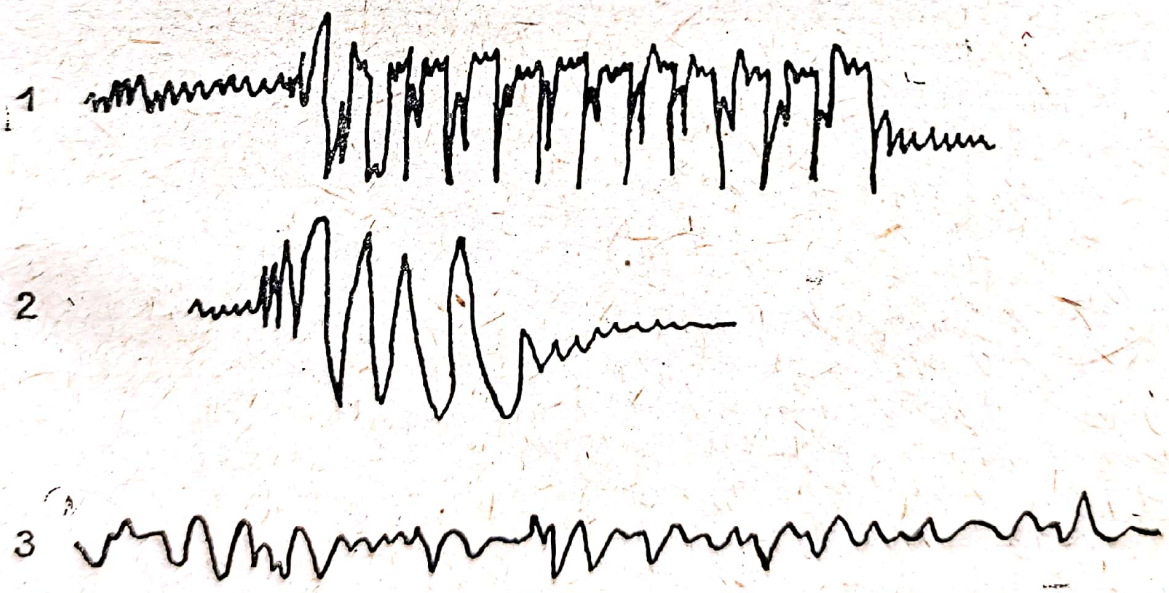


Fig. 11,3. Electroencefalogramă patologică

1 și 2 – epilepsie; 3 – comă

Scanned with OKEN Scanner

Se constată că pentru ca să aibă loc geneza și mișcarea gîndirii este necesar ca regimul de funcționare a scoarței să fie de tipul denumit „veghe".

În toate celelalte cazuri, activitatea de prelucrare a informațiilor se produce în alt mod, în unele cazuri apar tulburări — cum sînt, de exemplu, stările confuzive, manifestările onirice, stările de obnubilare etc.

Numai în condiția de veghe se realizează un model reprezentativ engramatic al excitațiilor în sistemul nervos, care să permită manipularea corectă a datelor provenind de la realitatea exterioară sau interioară, și numai în această stare sistemul nervos este apt să utilizeze aceste modele prin procedee caracteristice activității psihice.

XI, *3. Atenția.* Pentru desfășurarea unei activități psihice normale este necesar ca, în afara stării de veghe, informațiile de la receptori să ajungă la cortex.

În sistemul nervos central sosesc în mod continuu informații multiple de la aproape toți receptorii. Cortexul nu prelucrează însă totalitatea acestor mesaje, ci numai o parte a lor.

O primă filtrare se realizează prin tranzițiile veghe-somn. În acest sens, formațiunea reticulată și sistemul recrutant thalamo-cortical intervin pentru a regla nivelul de conștiență.

Un al doilea sistem de filtraj este reprezentat de un proces de selecție, chiar asupra mesajelor aferente — ceea ce se realizează la un nivel subcortical. Din cauza capacității relativ reduse a cortexului de prelucrare a informației — în comparație cu capacitatea de informare a tuturor căilor receptoare —, numai o parte a mesajelor aferente sînt prelucrate de către scoarță. Alegerea acelor semnale care vor fi prelucrate nu se face total aleator, ci în funcție de anumiți factori ponderatori.

Un prim factor ponderator este reprezentat de intensitatea excitantului. Între mai mulți excitanți de aceeași natură va fi selectat mai ușor excitantul mai intens.

Lucrurile se petrec ca și cînd mesajele aferente ar fi comparate între ele ca frecvență de descărcare (care am

Scanned with OKEN Scanner

văzut că codează intensitatea), fiind lăsate să treacă spre zonele de prelucrare corticală numai cele care au cea mai scurtă perioadă de repetiție a impulsurilor. Este posibil ca această selectare să se facă la nivelul formațiunii reticulate. Acest mecanism (de tipul unui filtru „trece-sus") nu este însă pe deplin elucidat.

Un al doilea factor de pondere — și poate cel mai important — este determinat de intervenția diferitelor mesaje motivaționale, care activează anumite programe comportamentale sau conferă un anumit scop comportamentului. Un anumit semnal motivațional impune o selectare a semnalelor aferente, în sensul că se ponderează pozitiv anumite excitații care sînt favorabile desfășurării programului fixat și, din contra, se ponderează negativ acele excitații pe care le considerăm a fi defavorabile programului nostru.

În acest caz, programul de selectare este variabil și depinde de natura motivației. Toate aceste mecanisme au și aspecte afective, ceea ce implică un dispozitiv cibernetic complex de detectare a semnalelor, de recunoaștere a anumitor indici, de comparare a lor cu alte semnale stocate și de selectare a anumitor funcții de răspuns în raport cu indicii identificați.

Această operație de selectare se face pe baza circulației informației prin formațiunea reticulată, în care există anumite specializări funcționale regionale, prin sistemul nespecific thalamic, prin circuitele hipothalamice și prin circuitele neuronale ale sistemului limbic și amigdalian.

Un al treilea sistem de ponderare este reprezentat de însăși intervenția scoarței cerebrale, care își controlează singură intrările, reglînd fluxul informațiilor aferente și selectînd anumite mesaje pe care le lasă să treacă și din contra, respingînd altele. Acest mecanism funcțional explică sistemele conexionale descendente, prin care scoarța cerebrală controlează regimul de funcționare a diferitelor porțiuni ale formațiunilor reticulate și a diferiților receptori periferici. Aceste sisteme conexionale centrifuge sînt descrise morfologic, iar electrofiziologia a pus în evidență principiul lor de funcționare.

Scanned with OKEN Scanner

Mecanismul atenției corespunde tocmai intervenției diferitelor filtre care, din totalitatea mesajelor trimise de receptori la un moment dat, permite accesul spre zonele corticale numai a unora. Natura filtrajului implicat în atenție poate fi foarte diferită, indicii de recunoaștere

Fig. 11,4. Sisteme corticofugale

puși în joc putînd fi uneori simpli, alteori deosebit de complecși. De exemplu, ne poate interesa apariția unei lumini, indiferent de culoare, atunci cînd ne-am rătăcit și dorim să ajungem la o locuință omenească sau la un alt punct marcat de prezența oamenilor, iar în alte cazuri sîntem atenți numai la timbrul caracteristic al unui anumit instrument în timpul unui concert etc.

§ XI, *4. Senzația.* Informațiile ajunse în cortexul aflat în stare de veghe sînt prelucrate de către neuronii corticali. Această prelucrare stă la baza reflectării lor în gîndire.

Scanned with OKEN Scanner

Cea mai elementară treaptă informațională reflectată în gîndire este senzația.

Senzația implică în primul rînd ca la nivelul cortexului cerebral, aflat în stare de veghe, să ajungă, codată într-un anumit mod, informația care provine de la receptori.

Fig. 11,5. Proiecțiile corticale ale analizatorilor

1 – analizatorul cutanat; 2 – analizatorul proprioceptiv; 3 – analizatorul gustativ; 4 – analizatorul olfactiv; 5 – analizatorul auditiv; 6 – analizatorul vestibular; 7 – analizatorul vizual

Neurofiziologia modernă a demonstrat că la nivelul cortexului există anumite regiuni (porțiunile corticale ale analizatorilor), unde apar modificări electrice caracteristice, în cazul excitării diferiților receptori. Aceasta constituie pînă în prezent singura dovadă pe care o avem despre formarea unui model neuronal al excitației. Analiza acestor date din neurofiziologie arată că se folosește în primul rînd un cod spațial.

1. În adevăr, pentru fiecare tip de receptori (vizuali, auditivi, olfactivi, gustativi, cutanați, proprioceptivi, viscerali) există una sau mai multe zone corticale, a căror distribuție topografică este reprezentată în figura 11,5.

Scanned with OKEN Scanner

2. Fiecare din aceste zone este împărțită în mai multe porțiuni, care sînt în corespondență cu receptorul periferic de la care poate veni informația. În capitolul VII s-a arătat că există o proiecție a fiecărei porțiuni a retinei pe cîte o porțiune corespunzătoare a zonei vizuale, o reprezentare a fiecărei porțiuni a melcului (deci a unei benzi de frecvență) în cîte o porțiune a zonei auditive; o reprezentare a fiecărei porțiuni a pielii în cîte o porțiune a zonei cutanate etc.

S-a arătat că proiecția diferitelor porțiuni periferice pe zonele corticale corespunde cu originalul periferic numai topologic — adică în sensul raporturilor lor spațiale reciproce. Din punct de vedere dimensional, ele sînt deformate, așa că unele porțiuni periferice mici au pe cortex o reprezentare mai întinsă decît alte porțiuni periferice mai mari: metrica corticală nu corespunde metricii periferice.

Pentru analizatorii vizuali și cutanați, întinderea spațială corticală este proporțională cu cantitatea de informație care vine de la porțiunea periferică respectivă. Astfel, pe 1 cm² de piele de pe vîrful degetelor se poate detecta o cantitate de informație mult mai mare decît de pe 1 cm² de piele de pe spate. De asemenea, datorită modului de organizare cibernetică a retinei, centrul ei (macula) poate detecta pe fiecare unitate de suprafață mai mulți biți decît periferia ei, de aceea și reprezentarea ei spațială este mult mai întinsă.

În cazul analizatorului auditiv, reprezentarea corticală a tonurilor este proporțională cu logaritmul frecvenței sunetului — de unde rezultă proiecția echidistantă a gamelor.

Pentru ceilalți analizatori, principiul proiectării spațiale corticale nu este încă cunoscut.

Se poate însă considera că fiecare teritoriu receptor periferic este subîmpărțit într-o serie de cîmpuri receptoare elementare, în care se află unul sau mai mulți receptori. Cu cît aceste cîmpuri sînt mai mici — deci și mai dese —, cu atît cantitatea de informație detectabilă pe unitatea de suprafață este mai mare — ceea ce duce la posibilități de discriminare mai mari.

În fiecare zonă corticală se pot delimita cîmpuri receptorii centrale elementare, care corespund cîmpurilor periferice.

Scanned with OKEN Scanner

Metrica ariilor corticale de proiecție a receptorilor determină capacitatea informațională a sistemelor sau a canalelor „capăt periferic" → „capăt central", în cadrul fiecărui analizator.

3. Intensitatea excitantului este codată în unele cazuri tot spațial. Fiecare cîmp cortical elementar nu este antrenat în totalitate decît pentru intensitatea maximă (de saturație) a sistemului. Între valoarea de prag și valoarea de saturație se află cuprinse gradiente care se traduc prin antrenarea unui număr de elemente neuronale din ce în ce mai mare din cadrul cîmpului receptor respectiv : există deci un proces de traducere intensitate — număr.

Existența unor gradiente de suprafață (sau mai corect de volum) pentru variațiile de intensitate ale excitantului reprezintă baza cibernetică a relației cantitative psihologice dintre intensitatea excitației și intensitatea senzației, care a fost exprimată de legea lui Weber, conform căreia intensitatea s a senzației este o funcție de intensitatea e a excitației :

$$s = \Psi(e - e_0)$$

în care e_0 este pragul.

Asupra funcției Ψ sînt încă discuții. Fechner consideră că funcția Ψ este logaritmică, ceea ce ar fi în concordanță cu forma logaritmică a funcției de transfer a receptorului — lege în general valabilă pentru intensități medii ale excitației — și cu gradientele corticale în general proporționale cu decibelii, așa cum au demonstrat experimentele efectuate cu analizatorul auditiv.

Stevens consideră că funcția Ψ este exponențială, admițînd o relație de forma

$$s = K(e - e_0)^n,$$

în care K este un factor de proporționalitate, iar n un exponent care variază pentru fiecare excitant. Iată cîteva valori ale lui n : 0,33 pentru excitațiile luminoase, 1,6 pentru excitanții calorici, 3,5 pentru stimulările electrice.

Cercetările lui Stevens arată, așadar, că diferiții analizatori au modalități diferite de funcționare.

Scanned with OKEN Scanner

4. Sistemul nervos trebuie să asigure codarea desfășurării în timp a stimulilor, deoarece în cortex mesajele aferente determină o serie de postefecte, electric detectabile, și care sînt expresia intervenției circuitelor reverberante corticale și corticosubcorticale.

Desfășurarea în timp a stimulilor trebuie codată în mod special, deoarece în sistemul nervos mesajele sînt prelucrate un timp mai îndelungat. Se cunosc în acest sens experimentele lui Chang, care a pus în evidență descărcări repetitive în lungul unui circuit cortico-thalamo-cortical, provocate de o stimulare unică a unui cîmp receptor periferic. De asemenea, în scoarța cerebrală vizuală au fost evidențiate o serie de postefecte succesive, care coincid în timp cu postimaginile subiective ce se ivesc după o stimulare unică a retinei.

Delimitarea în timp a mesajelor aferente este realizată prin existența în scoarța cerebrală a celor trei tipuri de sisteme neuronale aferente: tipul ON, tipul ON-OFF și tipul OFF (Jung).

Aceste trei sisteme asigură marcarea începutului mesajului, marcarea oricărei variații în intensitatea mesajului și, în mod special, terminarea acestuia.

XI, *5. Percepția.* La diferite nivele ale rețelelor nervoase se produc grupări și regrupări ale mesajelor aferente venite din același cîmp senzorial sau din cîmpuri diferite. Fenomenul acesta a fost pus în evidență prin metode electrofiziologice, studiindu-se răspunsul neuronilor izolați și constatînd diferite moduri de convergență a semnalelor aferente pe aceeași unitate neuronală.

Acest fenomen este evident în mod deosebit la nivelul cortexului cerebral, unde se observă suprapunerea parțială a cîmpurilor receptorii elementare și convergența unor semnale sosite de la diferiți receptori. Astfel, în cortexul vizual sosesc, alături de semnalele optice, și semnale din sistemul vestibular, prin fibre speciale (Jung).

Și în alte regiuni ale scoarței cerebrale s-au pus în evidență, într-o aceeași arie, proiecții venite de la mai multe tipuri de receptori (așa-numitele arii cerebrale polisenzo-

Scanned with OKEN Scanner

riale). Aceasta explică baza neurofiziologică pentru gruparea mai multor semnale aferente, ceea ce ne conduce la ideea că modelele constituite în rețele neuronale pentru diferiții stimuli au structuri deosebit de complexe.

Se știe, de asemenea, că atît mediul intern, cît și cel extern nu sînt formate din calități elementare, ci din obiecte și fenomene complexe. Aceasta face ca în sistemul nervos central să sosească în permanență grupuri de semnale. Cortexul cerebral primește, de asemenea, în mod continuu, astfel de grupuri de semnale.

Psihologia arată că în activitatea sistemului nervos există posibilitatea de a se pune în evidență, eventual de a izola grupuri de semnale, corespunzînd unor unități. Acest proces — denumit percepție — este în fond un proces de detectare a formelor; aci „formă" corespunzînd termenului englez *pattern* — noțiune centrală în neurocibernetica actuală. Noțiunea de formă se referă atît la formele vizuale, cît și la cele auditive sau la cele detectate prin sensibilitatea cutanată, gustativă etc. În unele cazuri, termenul de formă poate avea o semnificație polisenzorială, implicînd intervenția simultană a două sau mai multe tipuri de receptori.

În toate cazurile este vorba de o mulțime de semnale care se caracterizează printr-o anumită distribuție spațială sau spațiotemporală. Forma percepută poate fi foarte simplă — ca anumite tonuri sau anumite direcții detectate de retină, dar poate fi și deosebit de complexă, ca de exemplu o anumită persoană umană.

Principiul funcțional pe baza căruia sistemul nervos identifică formele nu este încă cunoscut. Tehnica a realizat însă o serie de modele privind recunoașterea unor forme elementare vizuale sau auditive.

Cea mai verosimilă ipoteză este că rețeaua nervoasă analizează distribuția spațiotemporală a neuronilor excitați într-o anumită matrice. Datele de fiziologie pledează pentru codarea spațială a tuturor mesajelor senzoriale. În rețeaua nervoasă, orice recunoaștere de formă — independent de natura excitației — corespunde identificării unei anumite forme, unei anumite configurații spațiale sau spațiotempo-

Scanned with OKEN Scanner

rale de neuroni excitați. Unele principii de identificare a formelor au fost expuse în capitolul VII.

Rezultă de aci că la baza percepției — deci a detectării formelor — stă un proces activ de prelucrări multiple și succesive ale informațiilor elementare care sosesc de la receptori. Fără acest proces nu am avea decît un mozaic de senzații elementare, distribuite statistic în cîmpul perceptual. Datorită însă programelor preexistente sau în curs de elaborare, ca și repertoriului de forme cu ajutorul cărora identificăm și care constituie un sistem de „coordonate" (sau un sistem de referință), de asemenea în continuă restructurare, acest mozaic este descifrat. Diferitele forme din fondul general de semnale aferente sînt astfel integrate.

În cadrul acestui proces trebuie să includem și operațiile prin care se extrag anumiți invarianți ai formei, în raport cu unele note accidentale : dimensiuni, viteză de desfășurare, culoare etc.

Principiul acestui proces ar putea fi reducerea oricărei forme la o poziție și o dimensiune standard. Tehnica a realizat o serie de aparate care permit efectuarea unor astfel de procese.

Desigur însă că procesele realizate de rețeaua nervoasă sînt mult mai complexe. Toate iluziile senzoriale puse în evidență de psihologi, începînd cu Aristotel, pledează pentru intervenția unor procese active de prelucrare a informației în cursul realizării percepției. Explicarea acestor iluzii ar permite descifrarea unora dintre principiile utilizate de rețeaua nervoasă umană în detectarea formelor.

Fiziopatologia permite, de asemenea, abordarea procesului de percepție prin analiza distorsiunilor de percepție pe care le provoacă anumite leziuni corticale.

Tot în cadrul procesului de detectare a formei se poate include și izolarea formei de substratul ei senzorial direct, ceea ce permite fenomenul de transpoziție. El are la bază realizarea unui model neuronal de contur, invariant în raport cu natura excitațiilor care îl determină. Rashewsky a stabilit un model matematic al acestei operații.

Datorită acestei operații, modelul neuronal al unui triunghi poate fi realizat în moduri diverse : prin detectarea

Scanned with OKEN Scanner

unui triunghi desenat pe o foaie de hîrtie sau pe o tablă; prin urmărirea cu degetul a conturului triunghiular al unui obiect; prin trasarea pe pielea spatelui a unui triunghi cu un obiect ascuțit; prin parcurgerea unui circuit triunghiular etc.

La fel, forma sau conturul melodic al unei anumite fraze muzicale poate fi modelat de o aceeași structură a rețelei neuronale, indiferent de instrumentul cu care este executată sau de tonalitatea în care este cîntată.

XI, 6. *Reprezentarea*. Una dintre particularitățile sistemului nervos, și în special a scoarței cerebrale, este detectarea formelor prin procesele complexe amintite în paragrafele anterioare, procese în cadrul cărora se realizează un model neuronal dinamic al realității. Acest model se transformă apoi într-un model engramatic, prin înregistrare în sistemul nervos. Acest model persistă un timp variabil, în anumite cazuri informația corespunzătoare lui putînd fi readusă în circulație în rețeaua neuronală.

Aceasta permite realizarea unui model dinamic, chiar în absența mărimii reale excitante — ceea ce în psihologie se numește reprezentare. Mecanismul de bază al acestei memorări și recirculări (sau ecforări) încă nu este cunoscut. Singurele lucruri pe care le cunoaștem este că modelul trebuie memorat mai întîi sub o formă dinamică — ceea ce se poate realiza prin memoria circulantă. De-abia după un interval de timp de ordinul minutelor modelul este transcris într-un sistem de memorare structurală.

În acest sens, ar putea pleda faptul binecunoscut că în caz de traumatism cerebral cel traumatizat nu-și reamintește de cele întîmplate în momentul traumatizării și o anumită perioadă de timp anterioară. Această amnezie retrogradă s-ar explica tocmai prin necesitatea ca mesajele recepționate să circule un anumit timp înainte de a fi înregistrate în memoria structurală.

Transcrierea din memoria circulantă în cea structurală se face cu participarea activă a sistemului limbic și, în special, a complexului fornix — corp mamilar — și a lobului temporal. Ecforarea sau rememorarea implică intervenția

Scanned with OKEN Scanner

altor mecanisme, de asemenea necunoscute. În sprijinul acestei teze menționăm faptul că în patologie se observă o alterare disociată a acestor două funcții (amnezia retrogradă și amnezia de rememorare). Pentru ecforare, un rol important îl joacă lobul frontal și lobul temporal.

Ecforarea reprezentărilor implică intervenția unui sistem de selectare pe care, prin analogie cu ceea ce se realizează în tehnică, ni-l putem imagina ca bazat pe existența unor adrese de memorie. Nu cunoaștem însă nici cum este codată informația engramată, nici cum sînt realizate adresele de memorie, nici cum se face lectura informațiilor stocate.

În orice caz, din studiile de psihologie știm că sistemul de clasificare a informației în memorie este deosebit de complex, o aceeași imagine sugerîndu-ne prin asociație numeroase alte imagini, cu care are unele legături. Informația dată de un obiect este înregistrată în memorie în diverse rubrici, după diferiți indici de clasificare.

Tulburarea funcțiilor de ecforare a reprezentărilor produce diferite perturbații, printre care și halucinații.

Rezultă că putem accepta ideea după care, atît la baza percepției, cît și a reprezentării stau modele neuronale localizate în circuitele corticale sau corticosubcorticale, cu deosebirea că în cazul percepției, modelul este generat de informațiile filtrate și parțial prelucrate care sosesc de la receptori, în timp ce, în cazul reprezentărilor, modelul este generat de informațiile care provin din stocurile existente (care însă, evident, provin, la rîndul lor, tot din informații obținute prin receptori sau din prelucrarea acestora în sistemul cibernetic constituit de sistemul nervos central).

XI, 7. *Operații analitice și sintetice.* Funcțiile sistemului nervos central nu se rezumă doar la lectura (ecforarea) informațiilor stocate și la transformarea lor într-un model cortical (sau corticosubcortical), la care participă lobul temporal — așa cum o indică experimentele lui Penfield și Rasmussen — și sistemul hipocampo-amigdalian. Sistemul nervos are posibilități multiple de prelucrare a acestei informații.

Scanned with OKEN Scanner

În primul rînd, trebuie constatat faptul că modelul ecforat poate fi supus unei serii întregi de operaţii „mentale". Astfel, i se pot schimba dimensiunile, poate fi supus la operaţii de translaţie şi rotaţie, poate fi descompus, poate fi asociat cu acele părţi corespunzătoare care provin din alte sisteme senzoriale etc. Alături însă de aceste operaţii analitice se realizează şi operaţii de sinteză. De exemplu, se pot combina două sau mai multe modele, conducînd la un alt model final. Fantezia pictorilor fantastici, gen Hieronimus Bosch sau chiar în unele cazuri Breugel şi Dürer, montează în unele cazuri elemente aparţinînd unei specii animale cu elemente aparţinînd altei specii animale. Valoarea acestei metode heuristice a fost, de altminteri, pusă în discuţie şi în domeniul creaţiei literare şi ştiinţifice, atît în secolul al XIII-lea, de către Raimundus Lullus, cît şi recent de către procedeele cibernetice contemporane.

În general, operaţiile sintetice efectuate asupra modelelor presupun analizarea lor prealabilă.

Modelele neuronale nu se referă numai la obiecte recepţionate, ci şi la acţiuni sau la interacţionarea acestor obiecte reale. În general, modelele nu se referă numai la forme corespunzătoare spaţiului real, ci pot fi imaginate într-un spaţiu abstract pluridimensional.

Rezultă că sistemul nervos, utilizînd analitic informaţiile stocate, le poate combina în cadrul unor sinteze din ce în ce mai complexe, realizînd mereu — în circuitele neuronale — noi modele, ce reprezintă forme din ce în ce mai abstracte, din ce în ce mai depărtate de realitatea primară. Elementele componente ale noilor forme rezultă din descompunerea analitică a formelor memorate, dar reunirea lor sintetică este o operaţie în care, în afara unor programe deterministe, pot interveni şi factori aleatori.

Sistemul nervos reuşeşte astfel să creeze combinaţii noi, în care intervin atît mesajele sosite în prezent de la receptori, cît şi mesajele stocate ce reprezintă experienţa trecută a sistemului. Noile combinaţii rezultate sînt, la rîndul lor, stocate, adăugîndu-se la sistemele memorate, îmbogăţind fondul de forme engramate.

Scanned with OKEN Scanner

Prezența factorului aleator este importantă în special în cazul visului. În acest caz, dispozitivul de analiză și sinteză de mai sus funcționează după alte reguli. Se pare că activitatea creerului din cursul somnului și mai ales a visului este în legătură cu sortarea (și ordonarea) engramelor din dispozitivele de memorie ale creerului. În unele cazuri însă, aceste reuniuni aleatoare sînt utile creației estetice, mai rar și celei științifice.

Atunci cînd se instalează starea de veghe, combinarea informațiilor devine ordonată, iar legile care prezidă la realizarea ei depind și de motivație și de tonusul afectiv.

Combinațiile de informații permit experimentări mentale care servesc la fixarea strategiei optime în vederea realizării scopurilor impuse de stimulii motivaționali. În modul acesta, folosirea engramelor intervine ca un sistem complex de optimizare a comportamentului, care, în fond, tinde la realizarea unei stări de destindere și de plăcere și evitarea unei stări de încordare, de suferință, de teamă — excepție făcînd unele cazuri patologice.

În cadrul acestor operații nu sînt angajate numai modelele neuronale ale excitațiilor trecute, ci și cele ale excitațiilor prezente. Între excitațiile prezente și cele trecute există permanent o influență reciprocă, o confruntare a lor. Rezultatele acestei confruntări sînt variate. Cel mai interesant aspect îl constituie faptul că modelele excitațiilor prezente sînt comparate cu modelele stocate, compararea făcîndu-se, în general, pe baza unor indici de recunoaștere. Aceasta implică însă faptul că modelele neuronale nu sînt stocate aleator, ci potrivit anumitor principii de clasificare. Din compararea modelelor prezente cu modelele stocate rezultă noi elemente, care intervin în dinamica informațională a rețelelor neuronale.

Operațiile de analiză și de sinteză amintite și mai ales experimentările mentale și procesele de recunoaștere citate reprezintă intervenția creatoare a rețelelor neuronale. În jocul acesta de analiză și sinteză stă secretul creației sub toate formele existente, adică artistice și științifice.

Desigur că rețelele neuronale nu generează informație în sensul teoriei informației. Aceste rețele extrag toată

Scanned with OKEN Scanner

informația din lumea reală, cu obiectele și fenomenele ei, detectate și traduse de organele receptorii. Cel mai complex sistem nervos nu face decît să prelucreze informația care vine prin receptori și care stă atît la baza imaginației, cît și a recunoașterii formelor. Întregul comportament al unei ființe vii se bazează, în cele din urmă, pe activitatea sistemului nervos, care își exteriorizează stările prin efectori.

Senzația, percepția, reprezentarea, imaginația și recunoașterea sînt forme de reflectare a realității în conștiință. Ansamblul lor reprezintă un prim palier al cunoașterii: cunoașterea senzorială. Un echivalent al ei există și în lumea animală.

Ceea ce deosebește însă — sub raport biologic — pe om de întreaga lume animală este complexitatea calitativ deosebită a sistemului nervos central, care permite o prelucrare cu mult mai amplă a informațiilor primite din lumea exterioară, elaborarea unor modele mai abstracte și de aci întreaga superioritate a omului față de toate celelalte forme de organizare a materiei pe planeta noastră.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul XII

MECANISMELE GÎNDIRII ABSTRACTE ȘI ALE LIMBAJULUI

XII, *1. Generalități.* I. După cum s-a arătat în capitolul precedent, baza cibernetică a proceselor care definesc cunoașterea senzorială este constituită de formarea în scoarța cerebrală a unui model neuronal al excitațiilor, engramarea (memorarea) și ecforarea (explorarea, lectura) acestui model, ca și anumite operații analitice și sintetice, efectuate de rețelele neuronale asupra acestor modele.

Operațiile fundamentale ale cunoașterii senzoriale — adică recepționarea mesajelor, gruparea lor după anumite criterii, memorarea, compararea, analizarea și sintetizarea lor pot fi reproduse de diferite modele tehnice, în special electronice.

Caracteristic cunoașterii senzoriale este faptul că ea rămîne în domeniul concretului. Cunoașterea senzorială dă imagini care aproximează obiectele individuale și relațiile obiective, însă numai sub aspectul lor concret. Cunoașterea senzorială (ca și sensibilitatea) nu permite însă trecerea de la fenomen la esență și la descoperirea legilor obiective.

Aceasta nu este posibil decît atunci cînd se realizează o nouă treaptă a procesului cunoașterii, anume treapta rațională, logică, treaptă care permite trecerea de la concretul senzorial la abstract și apoi la concretul logic. Evident, aceasta presupune o sporire considerabilă atît a populației neuronale a sistemului nervos, capabil de a efectua această trecere, cît și o structurare mai complexă a acestei populații.

Datorită activității neuronilor care prelucrează informațiile venite de la receptori, devine posibilă reproducerea în planul gîndirii a imaginilor obiectelor reale și a relațiilor dintre acestea (deci a substanței și a mișcării în esențiali-

Scanned with OKEN Scanner

tatea lor). Se depășește astfel simplul „experiment mental" al cunoașterii senzoriale. Gîndirea este așadar forma cea mai complexă de reprezentare a realității, formă care presupune o prelucrare reversibilă mai complexă, mai profundă și mai subtilă a mesajelor venite de la receptori.

Pe treapta rațională (logică), formele cunoașterii sînt: noțiunea (conceptul), judecata și raționamentul. Cunoașterea rațională pare ruptă de realitate, dar neuropsihologia, psihopatologia și neurocibernetica arată că la baza ei stau tot informațiile venite din lumea exterioară. Aparenta rupere de realitate se datorează procesului de abstractizare și folosirii limbajului, acesta din urmă permițînd transpunerea realităților concrete într-un sistem simbolic.

Datorită proceselor de cunoaștere senzorială și rațională, comportamentul devine extrem de complex, iar adaptarea la condițiile de mediu devine nuanțată. Gîndirea conferă comportamentului oamenilor caracterul specific uman. Ea apare ca rezultat al unor procese care se desfășoară într-un sistem adaptiv extrem de complex. În cazul oamenilor, sîntem departe de automatismul rigid al nevertebratelor, care impresionează prin programele lor uneori atît de complicate, dar totdeauna fixe. De asemenea, sîntem departe de procesele de învățare automată, care adaptează programele înnăscute înregistrate în structurile nervoase ale unor animale mai evoluate.

Gîndirea umană își desfășoară activitatea în moduri foarte diverse. Considerînd sistemul nervos ca un sistem adaptiv, constatăm că acest sistem își stabilește strategia pe intervale de timp variabile — uneori extrem de lungi. Strategia comportamentului se bazează pe semnalele recepționate în prezent, pe cele din trecutul trăit de ființa considerată, dar și pe programele transmise de alți contemporani sau de generațiile trecute. În cazul omului, prin programe speciale se optimizează relațiile om-mediu, iar aceste strategii își arată întreaga lor valoare în special atunci cînd se depășesc condițiile obișnuite.

Gîndirea este mijlocul cel mai utilizat de optimizare a comportamentului uman. Ea însă nu poate fi izolată de

Scanned with OKEN Scanner

nici unul din celelalte sisteme de adaptare cu care se găsește într-o permanentă interacțiune.

2. Omul este produsul societății, mai exact, în primă instanță — al muncii în comun. Acest factor a condiționat și apariția formelor superioare de reflectare — gîndirea și limbajul. Sub raport biologic, însă, apariția gîndirii umane a fost posibilă datorită faptului că în evoluția speciilor trecerea la *homo sapiens* s-a însoțit de o considerabilă complicare structurală și funcțională a sistemului nervos. În linii mari, elementele lui sînt aceleași, atît la om, cît și la antropoide sau, în general, la vertebrate. În toate aceste cazuri, întîlnim aproximativ tot atîtea tipuri de neuroni care, din punct de vedere energetic sau cibernetic — cel puțin după datele actuale ale științei —, prezintă aceleași caracteristici. Pînă în momentul de față nu s-au putut evidenția la om tipuri de neuroni care să nu existe la alte animale. Se poate spune deci că, în principiu, în fiecare unitate a sistemului nervos prelucrarea semnalelor nu diferă la om față de celelalte animale. Schemele logico-matematice de neuron și sinapsă propuse de noi au o valoare generală și ele trebuie puse — ca element fundamental — și la baza activității nervoase superioare.

Ceea ce este caracteristic omului este, mai ales, complexitatea deosebit de mare a rețelei nervoase. În primul rînd, numărul neuronilor din sistemul nervos al omului este cu mult mai mare decît numărul neuronilor din sistemul nervos al altor animale. În al doilea rînd, distribuția statistică a diferitelor tipuri neuronale este deosebită la om, crescînd foarte mult procentul neuronilor mici de tip Golgi II. Aceasta sporește considerabil numărul treptelor — al nivelurilor axonale — prin care circulă informația. De asemenea, sînt modificate densitatea axonală medie, densitatea axonală la fiecare treaptă în parte, ca și întreaga topologie a conexiunilor interneuronale. Amintim că numărul neuronilor din cortexul cerebral uman este de ordinul 7×10^9, iar numărul conexiunilor dintre acești neuroni, după calculele lui Herrick, ajunge la cifra impresionantă de $10^{2\,783\,000}$. Totodată, există o distribuție de sinapse și de praguri sinaptice mult diferită la om față de celelalte ani-

Scanned with OKEN Scanner

male. Or, aşa cum s-a arătat (în capitolul despre reţelele neuronale), fiecare dintre aceşti parametri intervin în modul în care informaţia este prelucrată de către reţelele neuronale.

Creierul uman reprezintă cea mai complexă organizare morfofuncţională de pe planeta noastră. Numai materia ajunsă la un grad atît de perfecţionat de structurare poate realiza procese de tipul celor care constituie psihismul uman. Comportarea umană nu se explică însă numai prin această structurare a reţelei, ci şi prin programele de comportament înregistrate (în special, în cursul educaţiei) în reţea, programe care sînt expresia activităţii sociale a omului, deci rezultatul acestei activităţi.

3. Apariţia gîndirii umane este, aşadar, rezultatul întregii evoluţii biologice şi al antropogenezei, care marchează saltul de la biologic la social. Gîndirea optimizează activitatea umană, intervine în cursul acţiunilor omului asupra lucrurilor materiale. Rolul fundamental al gîndirii este de a fixa strategia transformărilor pe care omul le exercită asupra lumii reale. În acelaşi timp, rezultatele practicii influenţează şi gîndirea. Cum activitatea practică a omului (cu toate laturile ei) se dezvoltă în societate, este evident că gîndirea este şi ea un rezultat al dezvoltării omului în societate. Cu alte cuvinte, ea presupune cooperarea organizată a mai multor creiere. Datorită muncii sociale, omul se eliberează de corsetul programelor genetice şi-şi optimizează prin gîndire comportamentul, condiţie esenţială a progresului care caracterizează evoluţia umanităţii.

XII, 2. *Limbajul.* 1. Condiţia necesară a cooperării mai multor creiere este circulaţia informaţiei între ele. Rezultă de aci necesitatea unui sistem cibernetic de legătură între creiere, sistem constituit de limbaj.

La unele animale există un schimb reciproc de informaţii, bazat pe un cod cu un repertoriu foarte restrîns de variante posibile. La unele specii intervin semnale olfactive care, evident, au un repertoriu extrem de limitat şi, în general, procură doar indici de recunoaştere pentru specie, sex şi anumite momente caracteristice din punct de vedere fiziologic.

Scanned with OKEN Scanner

La multe specii, comunicația se face în mod dominant, prin intermediul semnalelor acustice, care însă și ele au un repertoriu foarte restrîns. După ultimele cercetări, chiar și la antropoidele cele mai evoluate numărul morfemelor care pot fi individualizate din punct de vedere acustic nu depășește 25.

Acest număr restrîns de variante nu ține de organele fonatorii (laringe, limbă, văl palatin etc.), ci de modul în care posibilitățile acestor organe sînt solicitate de rețeaua nervoasă. În general, la animale, variantele sonore traduc doar anumite stări emotive sau afective.

Un rol important în regnul animal îl joacă anumite comportamente motorii (atitudini, mișcări etc.), care funcționează ca un sistem optic de comunicare. Și în acest caz, repertoriul este redus, servind mai ales la traducerea anumitor stări afective. În această categorie de semnalizări optice trebuie inclus însă și sistemul de comunicare folosit de albine, sistem care se ridică pe o treaptă superioară. Albinele pot comunica prin succesiuni de mișcări existența unei surse de alimente, direcția în care se află aceasta și distanța pînă la ea. Aceste informații sînt comunicate în stup de albina care a descoperit sursa, cu ajutorul unui cod bine determinat, ce constă dintr-o serie de mișcări care, în succesiunea lor, constituie „dansul albinelor". Dansul însuși semnalează descoperirea sursei. Dacă sursa se găsește la mai puțin de 100 m de stup, albina descrie un parcurs circular, efectuînd așa-numitul dans mobilizator circular. Numărul parcursurilor efectuate de albină este, în acest caz, invers proporțional cu distanța de la stup la sursă. Dacă sursa se găsește la o distanță mai mare de 100 m, albina execută cu abdomenul o serie de mișcări de legănare într-o parte și în alta — executînd așa-numitul dans mobilizator balansat, dans la care numărul balansărilor este direct proporțional cu distanța. O altă mișcare de dans indică direcția sursei. Sistemul de referință în raport cu care se indică direcția sursei este constituit de o axă imaginară care unește stupul cu cea mai luminoasă porțiune a bolții cerești — respectiv cu Soarele, dacă acesta este vizibil (fig. 12.1).

Scanned with OKEN Scanner

Toate aceste sisteme de comunicare întîlnite în lumea animală se bazează în principal pe programe fixate genetic, care însă pot fi adaptate uneori la situații noi, în cadrul procesului de învățare automată — așa cum s-a arătat că, în general, pot fi adaptate programele înnăscute.

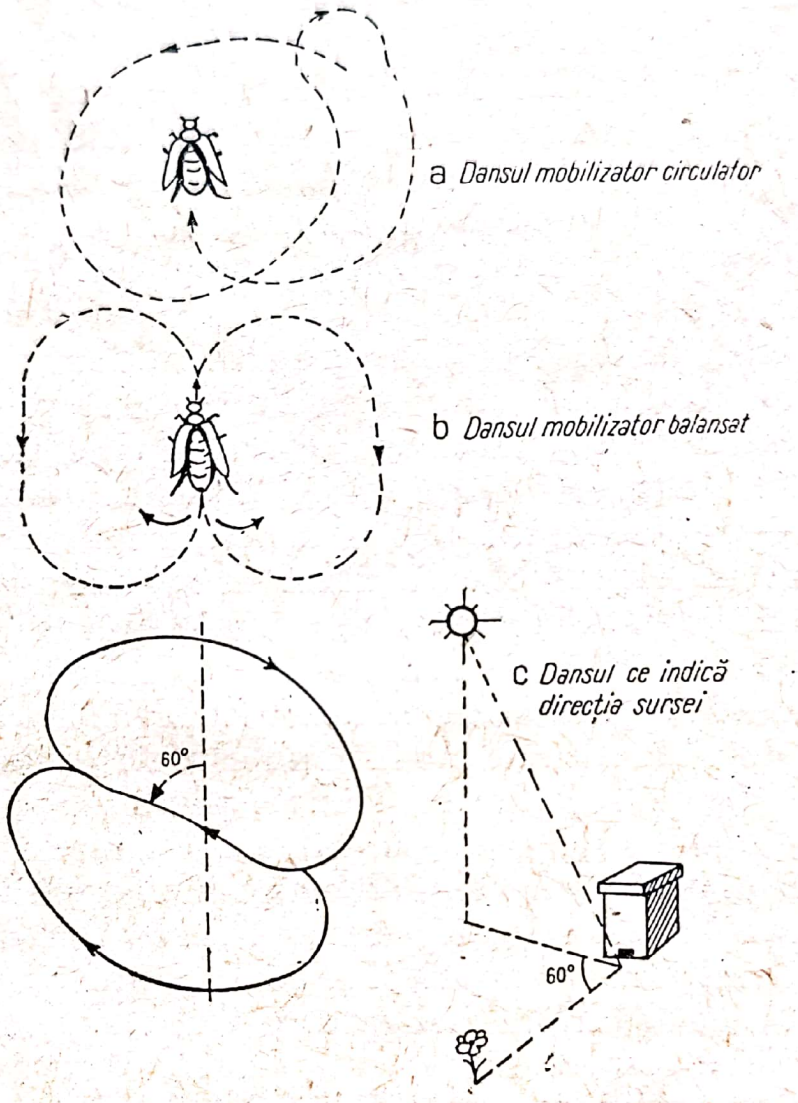


Fig. 12,1. Dansul albinelor (după Foti și Sănduleac)

2. La om, lucrurile se prezintă însă altfel. Omul dispune de limbă. Din punct de vedere matematic, limba este formată dintr-o mulțime D de semne (foneme sau morfeme, litere, simboluri, gesturi etc.) și dintr-un sistem de reguli (gramatica), cu ajutorul cărora se combină elementele mulțimii D. Plecînd de la semnele respective se formează

șiruri finite care pot fi numite respectiv cuvinte sau propoziții. În mulțimea tuturor combinațiilor posibile de semne (șirurile) se evidențiază o anumită submulțime, care formează mulțimea cuvintelor zise marcate, respectiv a propozițiilor marcate, și care sînt cele ce au un sens în limba considerată.

În ultima vreme s-au efectuat cercetări pentru analiza matematică a limbii. Limbile pot fi considerate și ca modele ale unor tipuri de mașini. De această problemă s-au ocupat o serie de specialiști (S. Marcus, I. Chomsky, K. Kulik etc.). Astăzi, studiul matematic al gramaticilor și modelarea lor pe automate formează un capitol esențial al lingvisticii matematice.

În momentul de față este greu să analizăm modul în care un om utilizează gramatica limbii materne în cursul vorbirii curente. În general, se presupune că gramatica este o totalitate de reguli date, care, aplicate unui fond de morfeme — de asemenea dat — conduce la vorbire. Analiza cibernetică efectuată în ultimul timp asupra limbajului dovedește că această ipoteză este numai în parte adevărată. În momentul de față, pentru nici una din limbile naturale nu se cunoaște o gramatică exhaustivă. Practica dovedește de asemenea că fondul de cuvinte nu este dat o dată pentru totdeauna, în cadrul fiecărei limbi existînd o viață a cuvintelor — unele cuvinte intrînd în uz, iar altele dispărînd. De asemenea, nu trebuie neglijat aspectul deosebit de important al regulilor de selecție a propozițiilor cu sens într-o limbă din mulțimea propozițiilor corecte din punct de vedere gramatical (dar nu obligatoriu cu sens), care se pot forma în limba respectivă.

În această privință, cercetările sînt de-abia la început. Există încercări reușite de creare a unor propoziții aleatoare în cadrul diferitelor limbi, iar altele chiar de elaborare a unor succesiuni de propoziții foarte apropiate de cele create în opera poetică a curentului dadaist.

În ultima vreme s-au realizat însă progrese și în ceea ce privește generarea propozițiilor cu sens. Menționăm în această privință poemele create de calculatorul electronic francez Calliope.

Scanned with OKEN Scanner

3. Capacitatea omului de a folosi limbajul a fost condiționată, pe plan morfo-funcțional, de dezvoltarea scoarței cerebrale. Aceasta a permis omului să dispună de o rețea neuronală capabilă să realizeze operații avînd gradul de complexitate întîlnit în limbaj : memorarea mulțimilor de simboluri elementare, memorarea regulilor gramaticale, aplicarea sistemelor gramaticale asupra mulțimii semnelor elementare, recunoașterea textelor auzite sau văzute, formularea comenzilor motorii care duc la emiterea fonemelor sau la scrierea literelor etc. Schema de principiu a dispozitivului neuronal care comandă sistemul uman de comunicații este aceea a unui automat instruibil. Sînt demne de reținut în această privință încercările de analiză a ontogenezei limbajului (T. Slama-Cazacu), deoarece aceste cercetări vor permite descifrarea mecanismelor care duc la însușirea în cursul educației, în fond neconștientă, a regulilor gramaticale și a regulilor semantice.

În orice caz, plecînd de la aceste cercetări, se va putea stabili un model abstract care apoi va putea fi realizat cu ajutorul modelelor cibernetice de neuroni.

Neuropatologia a putut localiza dispozitivul neuronal al vorbirii, izolînd diferite tulburări ale funcțiunii limbajului, reunite sub denumirea de afazii.

Diferitele forme de afazie corespund perturbării prin lezarea diferitelor componente ale sistemului automat adaptiv. O analiză a afaziilor din punct de vedere neurocibernetic va permite o înțelegere mai adîncă a modului de organizare a dispozitivului cu ajutorul căruia vorbim (I. Voinescu, L. Mihăilescu și A. Fradis).

De asemenea, unele tulburări ale limbajului, care apar în bolile psihice, de exemplu în schizofrenie, pot fi analizate admițînd că ele sînt efectul folosirii unui alt sistem gramatical inventat de bolnav pe baza tulburării sale mentale.

În schema unui sistem adaptiv intervin conexiuni inverse, care se regăsesc și în cazul limbajului.

De exemplu, noi ne ascultăm atunci cînd vorbim. Alterarea sau dispariția auzului duce la modificări profunde ale limbajului vorbit, iar dacă aceasta survine în primii 8—10 ani de viață, este periclitată însăși elaborarea limba-

Scanned with OKEN Scanner

julul. Demutizarea are drept principiu utilizarea unor mijloace tehnice-educative care să creeze alte conexiuni inverse.

În modelul neurocibernetic al limbajului propus de noi intervin în primul rînd intrări *i*, care reprezintă diferiţii receptori, printre care cei auditivi şi vizuali au o poziţie dominantă. Modelul dispune şi de o serie de ieşiri *e*, care reprezintă nervii motori ce merg la muşchii fonatori şi respiratori (în special nervii cranieni V—XII şi nervii rahidieni C_4 şi T_{10}). Partea centrală a dispozitivului este formată dintr-un sistem de recunoaştere R a semnalelor de intrare şi dintr-un stoc de programe SP, în care se află engramate modelele comenzilor motorii ce generează fonemele, respectiv literele, precum şi regulile lexice, sintactice, semantice, estetice etc. de combinare a lor. Conexiunea dintre ele se realizează prin selectorul logic SL, care stabileşte funcţiunile logice care leagă anumite forme stocate de semnalele de intrare, adică pune în corespondenţă semnalele de intrare cu anumite subprograme care urmează a fi extrase din stoc şi efectuate. Acest dispozitiv funcţionează în cazul vorbirii automate — de exemplu, în ecolalie, în cazul recitării unor versuri, a reproducerii unui rol, sau în cazul unor formule stereotipe, ca „bună ziua" etc. Pe acest principiu logic trebuie să funcţioneze şi sistemul fonator imitativ al unor păsări, cum ar fi papagalul.

La om, lucrurile sînt evident mult mai complexe. În primul rînd intervine un tonalizator afectiv TA, care face să alegem anumite subprograme, în funcţie de stimulii exteriori şi de starea internă. În unele cazuri, există programe extrem de simple — ca strigătele sau alte expresii sonore afective —, care pot fi generate de către stimulii exteriori numai prin intervenţia tonalizatorului afectiv. Un astfel de dispozitiv stă la baza „limbajului" animalelor, care îşi exprimă, în cadrul unui repertoriu limitat de emisiuni sonore, în special stările afective.

La om, organizarea modelului se complică şi mai mult, deoarece selectorul logic se află sub acţiunea dominantă a blocului G în care se desfăşoară activitatea gîndirii. De aceea, este foarte probabil ca între ieşirea din stocul de

Scanned with OKEN Scanner

programe şi reţeaua neuronală în care circulă mesajele ce stau la baza gîndirii să existe o conexiune inversă. Tonalizatorul afectiv ar interveni în cazul limbajului uman şi prin modularea fluxului de foneme care defineşte vorbirea.

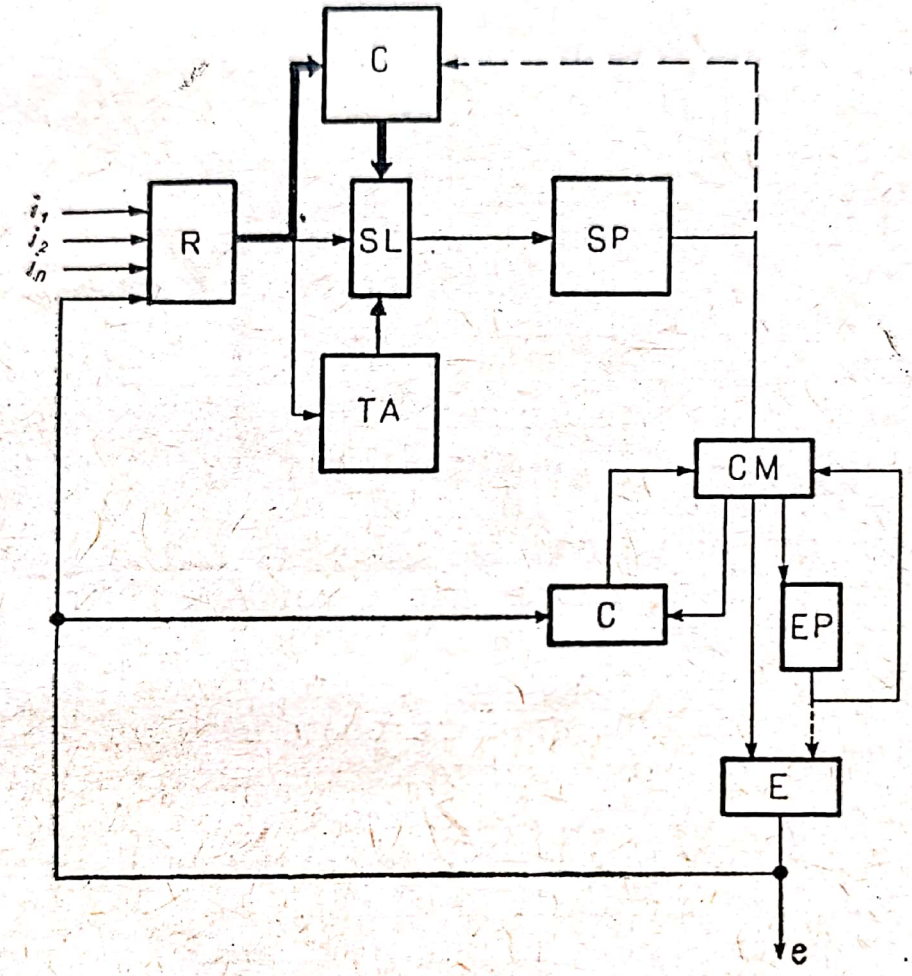


Fig. 12,2. Modelul logic al dispozitivului neurocibernetic al vorbirii

Lezarea elementelor acestui model (în special a stocului de programe, a selectorului logic şi a conexiunilor acestuia) produce afaziile.

Modelul trebuie să cuprindă şi elementele de traducere care transformă stocul de subprograme în mesaje care pot fi emise. În afara ieşirii propriu-zise E, există ca atare dispozitive de comandă motorie, care includ cortexul motor CM, sistemul piramidal P, sistemul extrapiramidal EP şi cerebelul C.

Scanned with OKEN Scanner

Rolul acestor elemente este elucidat numai în parte. Cerebelul poate fi considerat ca un sistem de optimizare a acțiunii motorii. La om, este preponderentă calea piramidală, în timp ce la animale căile extrapiramidale sînt dominante. Lezarea acestor elemente produce tulburări de vorbire (așa-numitele disartrii), dar nu de limbaj (afazii).

4. Capacitatea omului de a folosi limbajul rezultă și din evoluția sa social-istorică. Atît repertoriul de semnale, cît și regulile după care acestea se combină au apărut și s-au perfecționat în decursul istoriei. Nu este sarcina neurociberneticii de a elucida aceste probleme.

Cibernetica subliniază însă faptul că fiecare creier învață să vorbească de la oamenii cu care conviețuiește, limbajul însușindu-se numai în cadrul vieții sociale. Nici un creier izolat nu ar putea inventa un limbaj cu care să comunice cu alții. Atît vocabularul, cît și regulile gramaticale sînt însușite în cadrul educației primite. Limbajul este un sistem de semne convenționale, stabilit de popor în practica secular de comunicare a oamenilor între ei.

Trebuie subliniat faptul că, în mod normal, limbajul se învață în etapele timpurii ale ontogenezei. Din această cauză, ontogeneza limbajului nu poate fi izolată de ontogeneza gîndirii : totdeauna este vorba de ontogeneza relațiilor dintre limbaj și gîndire (T. Slama-Cazacu). Aceste interrelații au o structură deosebit de complexă, deoarece gîndirea umană se manifestă în limbaj.

Existența limbajului dă un aspect special și cunoașterii senzoriale. În contemplarea realității, omul adaugă datelor senzoriale structura categorială a limbii. În acest fel, limbajul constituie nu numai suportul proceselor de gîndire, dar și instrumentul principal de prelucrare a datelor senzoriale în sistemul de gîndire uman.

XII, *3. Cunoașterea rațională*. 1. Specific gîndirii umane este faptul că ea poate realiza treapta cunoașterii raționale. Aceasta este posibil datorită limbajului și vieții sociale.

Toate modelele neuronale care constituie baza reflectării realității curente în gîndirea senzorială sînt supuse în permanență unor operații multiple și complexe de către

rețeaua neuronală corticală. Este important faptul că aceste operații sînt efectuate prin circulația informației în agregate de neuroni, fiecare neuron funcționînd ca un automat analogic. Gîndirea rațională nu implică intervenția unui factor neurofiziologic special, ci doar o combinare structurală și funcțională de neuroni care să permită efectuarea operațiilor amintite.

Una dintre condițiile esențiale ale gîndirii raționale este clasificarea senzațiilor, percepțiilor, reprezentărilor, construcțiilor imaginative. Omul rațional clasifică în întreaga sa viață.

Operația de clasificare este o operație creatoare a rețelei neuronale. Criteriile de clasificare sînt multiple și variate, ele se formează în cadrul mai multor sisteme de referință. În același timp, se realizează în permanență clasificarea a înseși sistemelor de referință existente și crearea altora noi.

O dată un astfel de sistem creat, orice obiect sau fenomen detectat de organele receptoare este analizat în raport cu acel sistem de referință, stabilindu-se apartenența sau neapartenența sa la una din clasele elaborate în acel sistem de referință : sîntem deci în prezența unui proces de recunoaștere.

Din punct de vedere formal, se poate spune că în rețeaua nervoasă se creează un spațiu pluridimensional al indicilor de recunoaștere. Întreaga problemă a sistemelor de referință ale gîndirii raționale poate fi privită din punct de vedere matematic ca problema stabilirii indicilor de recunoaștere, al elaborării spațiului abstract și al zonării acestuia.

Baza mișcării gîndirii raționale constă în : elaborarea — pornind de la mesajele senzoriale — a unor sisteme de clasificare ; stabilirea raporturilor dintre diferitele sisteme de clasificare ; compararea oricărei senzații, percepții, reprezentări etc. cu sistemele de clasificare formate.

Rolul educației este de a conferi creierului uman cît mai numeroase și mai precise sisteme de clasificare. Istoria culturii umane poate fi privită și din punctul de vedere al evoluției sistemelor de referință ale gîndirii raționale.

Scanned with OKEN Scanner

Tocmai de aceea gîndirea raţională nu este şi nu poate fi produsul unui singur creier uman. Este nevoie de cooperarea multor creieri, îndelungul multor generaţii, pentru a se putea elabora criteriile şi sistemele de clasificare amintite. Cu alte cuvinte, este necesară o circulaţie de informaţie prin mai multe sisteme cibernetice de tipul creierului uman. În cursul educaţiei, omul îşi însuşeşte experienţa generaţiilor precedente şi contribuţia lui este să o adapteze necesităţilor lui şi, eventual, să o perfecţioneze în limitele posibilităţilor sale: aceasta reprezintă contribuţia fiecăruia la cunoaşterea materiei şi a mişcării sale.

Singurul mijloc de comunicare între oameni fiind limbajul (vorbit, scris, gestual etc.), rezultă că limbajul joacă un rol esenţial în formarea sistemelor de referinţă ale gîndirii raţionale.

2. După cum s-a arătat, clasificarea constă din formarea unui spaţiu abstract al indicilor de recunoaştere şi din zonarea acestuia în subspaţii. Fiecare subspaţiu apare ca o unitate de clasificare.

Este interesant de urmărit modul în care se structurează aceste mulţimi în ontogeneză. Procesul constituie obiectul de studiu al epistemologiei genetice (J. Piaget). Iniţial, este vorba de o colecţie de obiecte sau fenomene, reunite prin faptul că sînt denumite cu acelaşi cuvînt. Mulţimile astfel formate se pot grupa între ele sau, din contra, se pot subîmpărţi. Se ajunge astfel la o clasificare a lor şi, de asemenea, la o ordonare simetrică sau asimetrică a lor. Sîntem în faza gîndirii prelogice, în cadrul căreia cuvîntul (denumirea colecţiei) nu poate fi încă detaşat de realitatea concretă. În această fază însuşi cuvîntul are o realitate ontologică. Copilul, ca şi omul primitiv, crede în realitatea cuvîntului şi în posibilitatea ca el să se manifeste în contextul lumii reale prin anumite fenomene: aceasta este esenţa gîndirii magice. Încetul cu încetul, în gîndirea copilului cuvîntul îşi pierde semnificaţia ontologică şi devine indicele de recunoaştere a mulţimii de obiecte şi de însuşiri ale obiectelor.

După clasificarea obiectelor apare clasificarea fenomenelor — a proprietăţilor sau interacţiunilor dintre diferite obiecte. Mai tîrziu, se structurează clasificarea diferitelor

Scanned with OKEN Scanner

relații posibile — mai mare, mai mic, deasupra, inclus în etc. În fine, mulțimile respective nu mai reprezintă pentru copil doar simple colecții de elemente reunite printr-o etichetă comună : între componentele mulțimii apar anumite proprietăți, ca transformarea reciprocă și reversibilă a unui element al mulțimii în altul. Modelul matematic al unei astfel de mulțimi este reprezentat de grupul de transformare. Două sau mai multe elemente incluse în aceeași mulțime devin echivalente. În felul acesta s-a structurat o clasă, iar astfel de clase se află la baza conceptelor.

Se știe că un grup de transformări este caracterizat printr-un invariant al grupului, care corespunde cu acea proprietate comună ce aparține tuturor elementelor care constituie grupul. Invariantul este însușirea care detașează din totalul elementelor universului pe acelea care reunite constituie grupul respectiv. Acest invariant este corelat în rețeaua nervoasă cu cuvîntul care denumește întregul grup. Forma fonetică sau grafică, gestuală etc. a cuvîntului nu are nici o semnificație prin ea însăși — ca și numărul unei adrese din memoria calculatorului.

Semnificația cuvîntului provine din faptul că ea este corelată cu noțiunea în cadrul unui proces de învățare. Cuvîntul este ,,unealta'' care permite saltul de la contemplarea lumii reale la abstracțiunea conceptelor.

În operațiile efectuate la niveluri superioare, rețeaua nervoasă nu mai folosește toată masa de informații care structurează grupul de transformare — adică conceptul —, ci numai indicele de recunoaștere a acestuia (cuvîntul). Din punct de vedere cibernetic, aceasta constituie o reducere de redondanță, ceea ce — ca și operația de clasificare — este esența procesului de abstractizare. Să reținem însă faptul că oricît de adîncită ar fi abstractizarea, ea are ca punct de plecare, întotdeauna, mesajele venite prin receptori de la lumea reală.

Legile inducției logice — care, plecînd de la particular, ajung la concepte din ce în ce mai generale — sînt legile de formare a conceptelor.

Un model simplificat al formării conceptelor îl constituie perceptronul, care clasifică mărimile detectate în

funcție de anumiți factori de pondere. Clasificarea duce la structurarea unor grupuri de transformări. Recunoașterea unui anumit obiect sau fenomen implică stabilirea locului lui în sistemul sau sistemele de clasificare existente. Programul de studiu și de lucru al „inteligenței artificiale" tinde către realizarea unor astfel de modele tehnice din ce în ce mai complexe.

Elementul structural de bază al unui astfel de dispozitiv funcționează după tipul neuronilor. Cu ajutorul lui se pot construi rețele instruibile care să poată recunoaște forme. Acestea trebuie să ajungă la formarea unor mulțimi — cu toate proprietățile unui grup de transformări — care să fie corelate apoi cu cîte un indice special de recunoaștere, Acesta trebuie să fie modelul cuvîntului care îmbracă în forma lui noțiunea cu toate notele ei.

3. Stabilirea raportului dintre o senzație, percepție, reprezentare etc. și un concept — sau stabilirea raportului dintre concepte — constituie mișcarea gîndirii și se exprimă redondant cu ajutorul limbajului. Mișcarea gîndirii se manifestă, de obicei, sub forma propozițiilor. Structura propoziției nu depinde numai de repertoriul de semne și de sistemul gramatical respectiv, ci și de interrelația reciprocă a elementelor și mulțimilor de elemente detectate, stocate și clasificate după anumite criterii în creierul uman. Interrelațiile respective oglindesc însă realitatea obiectivă în toată complexitatea ei de structură și de mișcare. Aceste interrelații nu sînt așadar aleatorii, capricioase, ci se supun anumitor reguli — așa-numitelor legi ale gîndirii sau legi logice. Legile logice nu sînt un sistem artificial de ordonare inventat de oameni pentru comoditatea lor (Poincaré) și nici nu constituie un sistem de referință aprioric, înnăscut — ca programele comportamentale ale himenopterelor. Ele sînt un sistem de ordonare pe care oamenii, în decursul evoluției lor istorice, l-au învățat prin observarea fenomenelor reale ale lumii și l-au verificat încontinuu, în cadrul procesului de muncă, prin activitatea lor practică.

„Activitatea practică a omului a trebuit să pună de milioane de ori conștiința umană în situația de a repeta diferitele figuri logice, pentru ca ele să poată căpăta semni-

Scanned with OKEN Scanner

ficația unor axiome" (*Lenin, Opere*, vol. 38, Editura Politică, 1959, pp. 183—184.)

Legile logicii pot fi exprimate cu ajutorul unui aparat formalizat. Logica matematică exprimă în formă matematică raporturile dintre elementele constitutive ale unei clase și clasa respectivă (logica propozițiilor), exprimă raporturile dintre diferitele părți ale unei propoziții (logica predicatelor) etc. Logica propozițiilor precizează operațiile care permit constituirea unor noi clase din clasele existente. Logica clasică nu epuizează însă realitatea logică.

Logica propozițiilor în forma ei clasică este o logică bivalentă, în care propozițiile nu pot avea decît două valori logice — anume valorile adevărat și fals. Este însă clar că în gîndire se ajunge la propoziții care pot să nu fie nici adevărate, nici false, ci numai posibile sau imposibile etc.

În logica predicatelor se exprimă sub forma unor funcții propoziționale structuri logice de propoziții, în care intervin variabile individuale (x, y, ...) care joacă rol de subiecte și variabile predicative (F, G, H, ...) care exprimă însușiri. Se obțin astfel funcții de formă $F(x)$ etc.

De la funcțiile propoziționale se poate ajunge la scheme propoziționale, folosind în plus cuantori care se aplică variabilelor individuale. $\forall(x)$ indică o referire la toate elementele x (cuantor universal). Cuantorul existențial $\exists(x)$ indică o referire la cel puțin un element al domeniului.

De asemenea, se poate trece de la predicate de indivizi la predicate de predicate ș.a.m.d. Nu totdeauna predicatele se referă la însușiri, uneori ele se referă la relații — ceea ce implică existența în structura propoziției a cel puțin două elemente individuale, legate prin operatori numiți functori, pe care logistica îi analizează și îi exprimă simbolic.

Mișcarea gîndirii nu se rezumă la propoziții izolate. Ea este formată din succesiuni de propoziții. Se poate da o exprimare formală a relațiilor logice dintre propoziții.

Grație formalizării relațiilor logice dintre elementele gîndirii, aceste relații au putut fi modelate cu ajutorul dispozitivelor cibernetice.

În această direcție, se remarcă în primul rînd faptul că în cadrul logicilor bivalente se pot realiza modele utilizînd

Scanned with OKEN Scanner

elemente cărora li se atașează biunivoc valori într-o mulțime cu două elemente, numite convențional 0 și 1. Aceasta este, de exemplu, situația cu modelarea logicii lui Boole, cu ajutorul schemelor cu contacte electrice bipoziționale.

Lukasievicz a considerat o logică cu mai multe valori. Această logică poate fi modelată și ea cu ajutorul unor elemente fizice cărora li se atașază o variabilă care are valori într-o anumită mulțime finită.

McCulloch și Pitts — cum am văzut — au arătat posibilitatea de a se realiza modele neuronale simple cu ajutorul unor elemente convenționale, denumite neuroni, și care au numai două stări.

Există însă posibilitatea de a modela orice operator dat prin tabelele de adevăr, în cadrul unei logici cu n valori (Rosser, Tourquette), cu ajutorul unor elemente neuronale cuantizate.

Se consideră astfel un neuron cuantizat care, în funcție de intensitatea semnalului de la intrare, are n stări la ieșire.

Se asociază o valoare logică fiecăreia din cele n stări de la ieșirea neuronului.

Pentru a modela un operator unar care transformă o variabilă în alta este necesar să dispunem de un traductor intensitate-poziție, care face ca, în funcție de intensitatea stimulului de la intrare x, să existe semnal numai la una din bornele de ieșire.

La borna respectivă se obține un semnal de intensitate 1. La fiecare ieșire se dispune apoi un neuron care transformă pe 1 în valoarea α, după borna la care este conectat. Toți acești neuroni au ieșirile conectate în paralel. Intregul ansamblu modelează deci operatorul logic căutat, care realizează transformarea x (fig. 12,3 a).

În cazul în care se urmărește modelarea unui operator logic în care intervin două variabile independente, se utilizează doi transformatori de intensitate, unul pentru variabila x, altul pentru variabila y, ca în figura 12,3 b.

Dacă se dă tabela $0(x, y)$, atunci pentru o pereche particulară de valori — x și y — la bornele respective ale traductoarelor intensitate-poziție se montează un neuron de coincidență avînd pragul 2. Acesta produce la ieșire

un semnal 1, atunci cînd la cele două intrări ale sistemului x şi y au valorile particulare care ne interesează. În continuare, după acest neuron se dispune un alt neuron, care transformă pe 1 în valoarea β dată.

Iată deci că, plecînd de la realitatea fiziologică, putem admite că reţeaua neuronală poate funcţiona şi în cadrul unei logici polivalente.

Rezultă că în programul de cercetări al neurociberneticii trebuie să se înscrie analiza funcţionării reţelei neuronale corticale cu ajutorul logicilor polivalente.

Una dintre întrebările ridicate de neurocibernetici este şi aceea de a şti dacă totdeauna în cursul rezolvării problemelor logice creierul uman urmează cu stricteţe algoritmii daţi de logistică. Sînt autori (Turing), pentru care toate operaţiile cunoaşterii raţionale sînt algoritmice. Aceeaşi opinie împărtăşesc şi Sobolev, Leapunov etc., care susţin că şi în cazul în care pe plan conştient mersul gîndirii pare neformalizat, ca în cazul proceselor de intuiţie, există totuşi, pe plan subconştient, o serie de algoritmi (programe) care s-au format genetic sau prin experienţa fiecăruia.

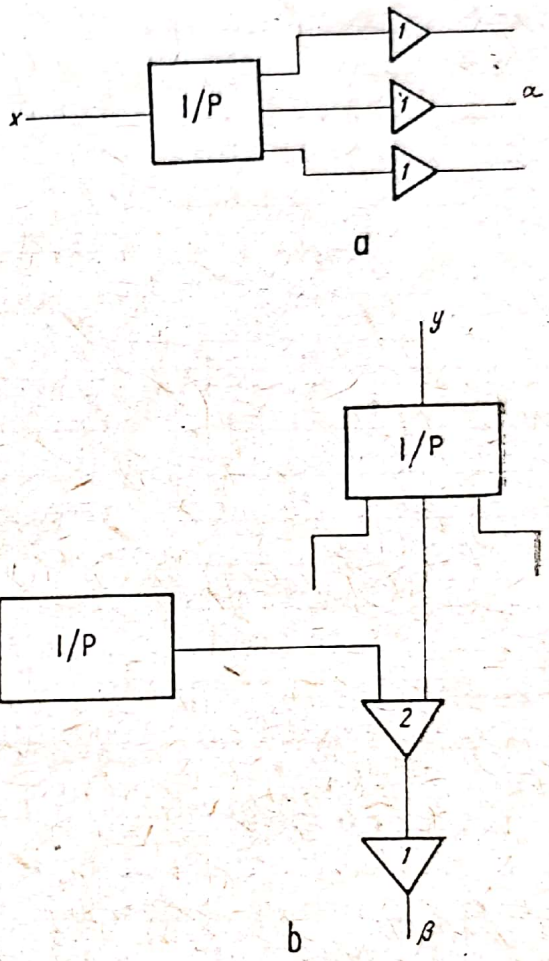


Fig. 12,3 a, b

Totuşi este greu de dat un răspuns categoric la întrebarea de mai sus. Se ştie că o maşină Turing nu poate rezolva decît probleme descrise algoritmic. Dacă se va demonstra că cunoaşterea raţională implică procese nealgoritmizabile, va rezulta că principiul de funcţionare — de

prelucrare a informației — al creierului este profund diferit de acela al calculatoarelor electronice. În orice caz, chiar dacă principiul de funcționare al creierului este același cu al calculatoarelor electronice, aceasta nu ar reduce deosebirile care există din punct de vedere cibernetic între cele două clase de sisteme.

În ceea ce privește aceste diferențe, se constată că mașinile de calcul sînt constituite din elemente relativ simple și relativ puțin numeroase în comparație cu creierul uman. Creierul reprezintă materie vie, în timp ce calculatorul reprezintă materie nevie.

Creierul uman este rezultatul dezvoltării filogenetice a materiei vii, de la simplele protiste pînă la apariția speciei noastre, în timp ce calculatoarele sînt construite de om. Activitatea creierului uman este condiționată, modelată, perfectată de activitatea socială a omului, în timp ce calculatoarele funcționează pe baza programelor elaborate de cei ce le-au construit și de cei ce le mînuiesc.

Calculatoarele nu modelează decît un aspect al activității cerebrale, și anume procesele logice. Ele sînt doar o nouă clasă de unelte cu care omul se ajută în cursul activității sale raționale.

Această posibilitate de a diferenția creierul de calculatoarele electronice nu este însă atît de tranșantă cum ar părea la prima vedere.

Gîndirea umană ascultă de anumite legități, iar în general legile unor fenomene pot fi modelate cu ajutorul unor fenomene de altă natură.

Diferența dintre materia vie și materia nevie încet, încet se șterge, în sensul că omul reușește să creeze în laborator materie vie, plecînd de la materie nevie.

În al doilea rînd, este puțin probabil ca creierul să funcționeze pe baza unor procese nealgoritmizabile sau nemodelabile.

Diferențele evidențiate între comportarea și natura calculatoarelor și natura și comportamentul omului nu sînt în general esențiale. În adevăr, calculatoarele sînt altceva decît omul, dar aceasta nu înseamnă că ele nu pot modela activități umane.

Scanned with OKEN Scanner

După părerea noastră, diferența esențială dintre creierul uman și calculator trebuie căutată în altă parte.

Este foarte greu să se realizeze un model al creierului uman. Populația neuronală a unui astfel de creier este de ordinul de mărime a 10^{10} neuroni. După cum s-a arătat, modelul fiecărui neuron este deosebit de complex, făcînd să intervină numeroase elemente de tip analogic : sumatoare, generatoare de impulsuri, sisteme de codare și decodare, memorie etc. Dacă s-ar urmări modelarea întregului creier, ar trebui să se realizeze un agregat care să fie constituit din 10^{10} calculatoare electronice — ceea ce este foarte greu de realizat. În momentul de față se estimează că în întreaga lume există circa $5 \cdot 10^4$ calculatoare electronice.

Dacă totuși am putea realiza într-un centru de calculatoare modelul unui creier de copil, reunind 10^{10} calculatoare electronice, între ele ar trebui să existe circa $_2 10^{10}$ legături, ceea ce reprezintă o cifră uriașă.

În afară de aceasta, oamenii nu trăiesc izolați, ca Robinson Crusoe. Activitatea omului este o activitate eminamente socială.

Fiecare centru din acesta ar trebui deci pus apoi în legătură cu alte centre similare. — În momentul de față trăiesc pe glob aproximativ $3 \cdot 10^9$ oameni. În plus, fiecare centru ar trebui să dispună nu numai de programele existente în acest moment, ci de toate programele elaborate în decursul istoriei omenirii.

4. Activitatea sistemului nervos depășește cu mult activitatea unui calculator care modelează numai activitatea logică. Sistemul nervos asigură comportamentul uman și asigură optimizarea acestuia în diferite procese ca homeostazia, reflexul condiționat, învățarea, formele subtile ale cunoașterii. S-a arătat cum diferitele trepte ale procesului de cunoaștere reprezintă o unitate dialectică care asigură reflectarea lumii reale în creierul omului.

Reflectarea lumii reale în conștiința umană constituie un proces deosebit de complex.

Din cele expuse în această lucrare putem să considerăm sistemul nervos uman drept un vast și complex sistem ciber-

Scanned with OKEN Scanner

netic, format din neuroni și sinapse și interpus între receptori și efectori (cf. fig. 12,4).

Asupra receptorilor acționează factorii de mediu, care reprezintă un flux informațional continuu de 10^{11} biți/secundă. Cercetările de neurofiziologie și psihologie au arătat că ansamblul receptorilor trimite către sistemul nervos central un flux de informații de ordinul a 10^7 biți/secundă. În schimb, sistemul nervos central emite către efectorii mușchiulari un flux de informații de ordinul a $3 \cdot 10^6$ biți/secundă. Diferența de biți se pierde în cursul prelucrării informațiilor în populațiile neuronale ale sistemului nervos central.

O parte din informații sînt canalizate direct spre efectori, grație aranjamentelor logice elementare ale rețelelor paucineuronale din palierele inferioare ale motilității (motilitatea reflexă elementară).

Cea mai mare parte din informațiile aferente este prelucrată în sisteme de recunoaștere și apoi, prin diferite dispozitive de selecție logică, este folosită pentru activarea unor programe motorii mai mult sau mai puțin complexe. Acestea se traduc în act datorită diferitelor structuri ale sistemului nervos, prin fenomenele motorii care constituie motilitatea complexă (comportamentul motor). Evident, aceasta implică și intervenția unor sisteme automate adaptive instruibile.

O foarte mică parte din fluxul informațiilor aferente străbate palierele superioare de activitate ale sistemului nervos unde se elaborează activitatea conștientă. Fluxul informațiilor care străbat conștiința umană este de numai 16 biți/secundă. Aceasta implică existența la intrarea în palierele respective a unor sisteme de filtraj și de codare optimală. De asemenea, presupune existența unor sisteme de memorie circulantă și de memorie engramată. La ieșirea din palierele superioare de activitate nervoasă trebuie să existe dispozitive de organizare și de selectare de programe motorii.

Conștiința este cea mai înaltă formă a reflectării și ea este posibilă numai datorită modului în care este structurat și funcționează creierul.

Scanned with OKEN Scanner

Noţiunea de conştiinţă are un sens cu mult mai larg decît cea de gîndire, cuprinzînd procese cognitive, afective şi volitive.

Modele ale proceselor cognitive s-au realizat. În ceea ce priveşte modelarea activităţii afective, ea nu este încă satisfăcătoare. Totuşi, încercări în această privinţă există. Comportamentul voluntar sau involuntar poate fi modelat mai uşor.

De exemplu, putem interpreta voinţa drept capacitatea unui sistem de a se lăsa mai mult sau mai puţin influenţat de factori externi (prezenţi sau înregistraţi în memorie) în realizarea obiectivului propus prin motivaţia internă.

Noţiunea de conştiinţă include procese psihice variate: senzaţii, percepţii, reprezentări, stări afective, sentimente, voinţă, gîndire. Ea este strîns legată de limbaj. „Conştiinţa este starea internă a materiei provocată de acţiunea lumii exterioare asupra creierului uman, prin intermediul organelor de simţ" (V. I. Lenin, *Opere complete*, vol. 18, Ed. Politică, 1936, ediţia a 2-a, p. 83).

O contribuţie însemnată la rezolvarea problemelor conştiinţei a fost adusă de cibernetică.

Modelarea cibernetică a unora dintre procesele conştiente demonstrează că, din punct de vedere ontologic, conştiinţa nu este opusă în mod absolut materiei. Oricît de specifică ar fi activitatea conştientă, sub raport funcţional ea prezintă analogii cu activitatea oricărui sistem dinamic cu autoreglare şi care este suficient de complex. Din punct de vedere cibernetic, reflectarea conştientă este, în esenţă, prelucrarea unor informaţii. Dezvăluirea analogiei funcţionale dintre activitatea conştientă şi comportamentul sistemelor cibernetice confirmă unitatea materială a lumii.

Scanned with OKEN Scanner

CAPITOLUL 1

1. Bălăceanu, C., Nicolau, E., *Schema logico-matematică a neuronului*, în „Neurologia, Psihiatria și Neurochirurgia", 7, 1962, Nr. 6, pp. 517—526
2. Bălăceanu, C., Nicolau, E., *Contribuții la cibernetica vederii*, în „Oftalmologia", v. VIII, 1964, Nr. 2, pp. 179—190
3. Bălăceanu, C., Nicolau E., *Contribuții la studiul transmiterii informației prin sinapsă*, în „Neurologia, Psihiatria, Neurochirurgia", v. VIII, 1963, Nr. 6, pp. 531—540
4. Bălăceanu, C., Nicolau, E., *Models of Neuronal Networks*, în „IVth International Congress on Cybernetics", Namur, 1966
5. Bălăceanu, C., Nicolau, E., *Contributions à la neurocybernétique de la phonation*, în „Cahiers de linguistique théorique et appliquée", III, 1966
6. Beliș, M., *Information Processing by Learning Systems*, în „Electronics Letters", v. II, 1966, Nr. 4, pp. 143—145
7. Beliș, M., *Prelucrarea informației în sistemele instruibile*, în „Telecomunicații", 10, 1966, Nr. 7, pp. 300—305
8. Boiangiu, D., Nicolau, E., Niță, C., *Instrumente, dispoziție și mașini matematice*, Editura Tehnică, București, 1963
9. Cartianu, Gh., *La correspondance entre les caracteristiques statiques et les paramètres dynamiques des organes électriques à résistance négative*. „L'Onde Electrique" (1949), ianuarie, Nr. 262, pp. 44—50
10. Cartianu, Gh., *Stabilitatea unui circuit electric oarecare cu rezistență negativă în sisteme neliniare*. „Buletinul științific al Academiei R.P.R.", Secțiunea de științe matematice și fizice III (1951), 2, pp. 261—292
11. Cartianu, Gh., *Über das Stabilitätsproblem der linearen*

Statistical Institute", Beograd, 1965

56. Rudeanu, S., *Axiomele laticelor și ale algebrelor boolene*, Ed. Acad. R. P. Române, 1963

57. Săhleanu, V., *La cybernétique comme point de vue*, în „2nd International Congress on Cybernetics", Namur, 1958

58. Săhleanu, V., Leahu, L. *Quelques problèmes concernant la cybernétique des systèmes biochimiques, în* „2nd International Congress on Cybernetics", Namur, 1958

59. Săhleanu, V., *Valoarea metodologică a ciberneticii și a teoriei informației în lumina materialismului dialectic*, în „Cercetări Filozofice", v. VIII, 1961, Nr. 4, pp. 987—1004

60. Spătaru, A., *Teoria transmisiunii informației*, Editura Tehnică, București, 1965

61. Theodorescu, R., Guiașu, S., *Teoria informației*, Editura Academiei R. S. România, București, 1966

62. Tănăsescu, T., *Curs de tuburi și circuite electronice*, v. III, Editura Academiei R. P. Române, București, 1957

CAPITOLUL 2

1. Adrian, E.D., „J. Physiol.", 62, 1926, p. 49

2. Beutner, R., „Biochem. Ztschr.", 137, 1923, p. 496

3. Bishop, C., „Amer. J. of Pysiol.", 89, 1929, p. 618

4. Blair, H. A., „J. Gen. Pysiol.", 15, 1932, p. 709

5. Cajal, S., Ramon, Y., *Histologie du Système nerveux de l'homme et des vértébraux*, Doin-Paris, 1909—1911

6. Conway, E., „Irish. J. Med. Sci.", 6, 1947, p. 593

7. Eccles, J. C., *The physiology of nerve cells*. J. Hop. Press. Baltimore

8. Eccles, J. C., *The neurophysiologycal basis of Mind*. Oxford. Clarend. Press, 1953

9. Fessard, A. E., *Ultrastructures et fonctions du Neurone*, în „Problèmes de structures, d'ultrastructures et de fonctions cellulaires", Y. A. Thomas, Masson & Co., Paris, 1955

10. Galambos, R., *Glia, Neurons and Information Storage* în „Macromolecular Specificity and Biological Memory", O. F. Schmidt, Cambridge, 1962

11. George, F. A., *The Brain as a Computer*. Pergamon Press Oxford, 1961

12. Hartline, H. K., „Am. J. Physiol.", 130, 1940 p. 690

13. Hodgkin, A. L., Huxley, A. F., „J. Physiol.", 117, 1952, p. 500

Scanned with OKEN Scanner

4. Cherry, C. *Two-Ears-but One World*, în „Sensory Communication." The M.I.T. Press, J. Willey & Sons Co., N.Y., 1961.

5. Desmedt, J. E., „J. Acoust. Soc. Am.", v. 34, nr. 8, part. 2, 1962, p. 1478

6. Groen, J. „J. Acad. Soc. Am"., v. 34, Nr. 8, part. 2, 1962, p, 1497

7. Hoghow, R. W., „J. Comp. Neurol.", 110, 1958, p. 1

8. Marshall, W., „J. of Neurophysiology", 4, 1949, p. 277

9. Maturana, H. R., Lettvin, J. Y, Pitts, W. H., Mc Culloch, W., „J. Gen. Phys., 43, supl., p. 129

10. Rashewsky, N., *Mathematical Biophysics*. Univ. of Chicago, Illinois, 1949

11. Ratlif, F., *Inhibitory Interaction and the Detection and Enhancement of Coutours*, în „Sensory Communication." The M.I.T. Press, Y. Willey & Son Co., N.Y., 1961

12. Reichardt, W., Varju, D., „Z. Naturforsch.", 146, 1959, p. 674

13. Ruch, T. C., *Senzația somatică*, în „Fiziologia medicală și biofizica", Editura Medicală, București, 1963

14. Sutherland, N. S., „Nature", v. 197, Nr. 4863, 1963 p. 119

15. Tunturi, A. R., *Anatomy and Physiology of the Auditory Cortex*, în „Neural Mechanisms of the Auditory and Vestibular System." Ch. Thomas Springfield, Illinois, 1960

16. Woolsley, C. N., Walzl, E. M., „J. Hop. Bull,". 71 1942, p. 315

17. Young, J. Z., „Nature", v. 186, nr. 4, 728, 1960, p. 836

CAPITOLUL 8

1. Adriani, E. D., Brohk, D. W., „J. Physiol.", 66, 1928, p. 81 „J. Physiol.", 67, 1929, p. 119

2. Bennet, H. S. „Am. Y. Phys. Med,", 34, 1955, p. 46

3. Călcăianu, Gh., Stoica, I., *Electroencefalografia și electromiografia*, Ed. Medicală, București, 1963

4. Huxley, A., Taylor, R. E. „Nature", 176, 1955, p. 1068

5. Porter K. R., Palade, G. E., „J. Biophys. Biochem. Cytol." 3, 1957, p. 269.

6. Renshaw, B., „J. Neurophys.", 4., 1941, p. 167

Scanned with OKEN Scanner

CUPRINS

Prefață 5

Introducere 9

Capitolul I — Elemente de teoria informației 17

§ I, 1. Generalități (p. 17); § I, 2. Entropia informațională (p. 21); § I, 3. Semnale (p. 25)

Capitolul II — Neuronul 35

§ II, 1. Generalități (p. 35); § II, 2. Excitația (p. 40); § II, 3. Conducerea (p. 57); § II, 4. Decodarea finală (p. 62)

Capitolul III — Sinapsa 64

Capitolul IV — Rețele neuronale 86

A. Rețele paucineuronale: § IV, 1. Generalități (p. 86); § IV, 2. Tratarea matematică a rețelelor neuronale (p. 88); § IV, 3. Tratarea logică a rețelelor neuronale (p. 89); § IV, 4. Rețele ON (p. 96); § IV, 5. Rețele OFF (p. 97); § IV, 6. Rețele ON—OFF (p. 98); § IV, 7. Rețele reverberante (p. 99); § IV, 8. Rețele pentru accentuarea contrastelor (p. 100); § IV, 9. Rețele care calculează funcția de corelație (p. 100); § IV, 10. Traductor intensitate-număr (p. 102); § IV, 11. Traductor intensitate-poziție (p. 103); § IV, 12. Rețele care recunosc forme elementare (p. 104); IV .13. Rețele instruibile simple (p. 106)

B. Rețele plurineuronale (p. 108)

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul V — Comanda și reglajul automat în neurocibernetică 113

§ V, 1. Generalități (p. 113); § V, 2. Analiza teoretică a sistemelor automate (p. 115); § V, 3. Mărimi de referință (p. 120); § V, 4. Programe (p. 121); § V, 5. Aferentația inversă (p. 123); § V, 6. Regimuri de funcționare (p. 125); § V, 7. Sisteme automate complexe (p. 129)

Capitolul VI — Recepția 135

§ VI, 1. Generalități (p. 135); § VI, 2. Schema unui receptor (p. 135); § VI, 3. Codarea calității (p. 137); § VI, 4. Codarea intensității (p. 140); § VI, 5. Codarea desfășurării temporale (p. 144); § VI, 6. Codarea distribuției spațiale (p. 146)

Capitolul VII — Analizatorii 147

§ VII, 1. Generalități (p. 147); § VII, 2. Transmiterea informației prin analizator (p. 148); § VII, 3. Corelarea și clasificarea mesajelor (p. 155)

Capitolul VIII — Efectorii 168

§ VIII, 1. Generalități (p. 168); § VIII, 2. Mușchii striați (p. 170)

Capitolul IX — Activitatea motorie reflexă 177

§ IX, 1. Generalități (p. 177); § IX, 2. Sistemul neuronilor intercalari (p. 177); § IX, 3. Aferentația inversă motorie (p. 185); § IX, 4. Reacții de susținere (p. 191); § IX, 5. Reacții tonice și posturale (p. 193); § IX, 6. Reacțiile de redresare (p. 205)

Capitolul X — Activitatea motorie complexă 210

§ X, 1. Comportamentul înnăscut (instinctele) (p. 210); § X, 2. Emoțiile (p. 221); § X, 3. Învățarea automată (p. 225); § X, 4. Sistemele de comandă motorie complexă (p. 235)

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul XI — Mecanismele senzoriale 246

§ XI, 1. Generalităţi (p. 246); § XI, 2. Niveluri de conştienţă (p. 247); § XI, 3. Atenţia (p. 250); § XI, 4. Senzaţia (p. 252); § XI, 5. Percepţia (p. 256); § XI, 6. Reprezentarea (p. 259); § XI, 7. Operaţii analitice şi sintetice (p. 260)

Capitolul XII — Mecanismele gîndirii abstracte şi ale limbajului 264

§ XII, 1. Generalităţi (p. 264); § XII, 2. Limbajul (p. 267); § XII, 3. Cunoaşterea raţională (p. 274)

Bibliografie 287

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

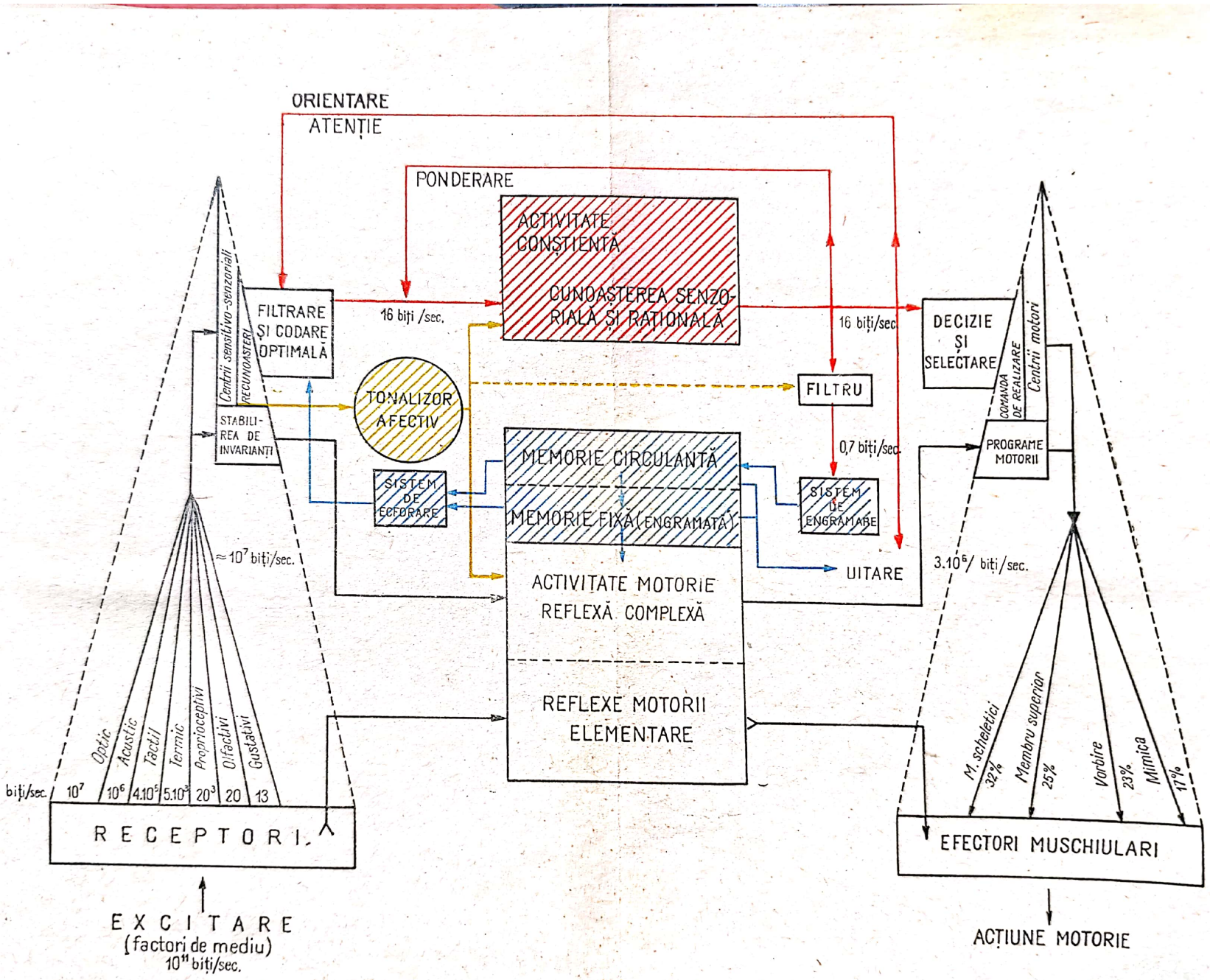


Fig. 12,4. Organogramă reprezentînd sistemul cibernetic al nevraxului uman (parțial după H. Frank)

Redactor resp. de carte: LIVIU DAMIAN
Tehnoredactor: Ana Sabău

Dat la cules 14. 12. 1966. Bun de tipar 22. 03. 1967. Tiraj 2000+80 ex. broşate, 2000+45+20 ex. legate 1/1. Hîrtie: scris II A 63 g/m². Format 54×84/16. Coli editoriale 15,41. Coli tipar 19,00+1 planşă. A. 14.961. Clasificarea zecimală: pentru bibliotecile mari 621.391, pentru bibliotecile mici 621.391.

Tiparul executat sub comanda nr. 924/1966 la Întreprinderea Poligrafică Cluj, str. Brassai nr. 5—7, Cluj — Republica Socialistă România

Scanned with OKEN Scanner

Valoarea observată (măsurată) − valoarea reală (adevărată) = eroare

Eroarea nu se poate măsura (stabili) dacă nu se cun. val. reală (Când val reală se stabilește tot prin măsurare este imposibil să se stabilească eroarea asociată oricărei măsurători (determinări).

Valoarea reală (adevărată) se stabilește prin metode statistice, fiind apreciată prin val. medie a val. observate ale caracteristicii de calitate ($\bar{X}$).

Val. observată (măsurată) $- \bar{X}$ = abatere.

Erorile (abaterile) se exprimă prin val. relativă

eroarea relativă (abaterea) $= \frac{\text{val. obs.}}{\bar{X}} \cdot 100$

Mărimea abaterilor exprimă precizia

Precizia unui măs. $= \frac{\text{val obs} - \bar{X}}{\bar{X}}$

Corectitudinea unui măs. $\Leftrightarrow$ exactitate.

Precizia unui măsurători $\Leftrightarrow$ reproductibilitatea.

Dacă un operator execută o serie de măsurări în condiții identice va observa că întotdeauna vă obține rezultate diferite. (dispersie) (Folosind calculul probabilit., se poate determina rezultatul cel mai probabil al unui șir de determ., evidențiind natura statistică a dispersiei valorilor observate ale caracteristicii numerice de calitate).

Dacă se efect. un nr mare de determ. rezultatele individuale se vor dispersa în jurul unui val. medii, în concordanță cu legile speciale ale erorilor.

(vezi caiet hivera)

Editura Științifică

La fel după cum în secolul trecut teoria atomică și metodele cantitative au deschis orizonturi cu totul noi fizicii și chimiei, tot astfel în ultimele două decenii teoria neuronului și cibernetica au deschis perspective nebănuite în înțelegerea modului de funcționare al sistemului nervos.

Prin neurocibernetică creierul uman descifrează modul în care este prelucrată informația în acea structură în care materia cunoaște cea mai înaltă formă de organizare pe planeta noastră — adică însuși creierul uman.

Lei 10,50

Scanned with OKEN Scanner